

KEK Proceedings 2011-2

June 2011

A/H/M/D

技術交流会報告集

Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK

KEK, Tsukuba, Japan

March 2, 2011

編集

久松 広美 坂井 浩 柿原 和久

Edited by

H. Hisamatsu, H. Sakai, and K. Kakiyara



High Energy Accelerator Research Organization

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2011

KEK Reports are available from:

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

Phone: +81-29-864-5137

Fax: +81-29-864-4604

E-mail: irdpub@mail.kek.jp

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

はじめに

技術部門連絡会議 技術調整役 久松 広美

機構の技術職員の資質向上を図ること、機構全体の技術レベルを高い水準に保つこと、技術職員の仕事の紹介を目的として技術交流会が開催されています。今年は加速器研究施設の技術職員の方々に企画実施の労をとって頂き、「KEKを支える技術」というテーマで開催して頂きました。当機構では技術職員は研究系で一体となって業務を遂行するように配属されます。技術職員各々の技術力の向上が機構全体の技術レベルの向上に結びつくという考え方には一理あるようですが、多様な技術の要求に対して現状の人員数を見れば、専門的になればなるほど周りの研究者とのコミュニケーションが多くなって、その人の技術力、専門性が機構全体の技術職員には伝わり難くなっていく傾向を感じます。ただ成り行きに任せるだけではだめで、機会をとらえて情報の発信を行い他の技術職と交流することが大事な要素であると思います。

技術交流会を通じて「何々の技術なら誰々さんに相談するのが良い」という情報を得ることのメリットを機構の技術職全員が大いに役立てて頂ければと思います。

努力して獲得した技術力なのですから、機構の中だけに留まらず、機構の外にまで自らの技術力を大いに知らせるように心掛けたいものです。

目次

(1)	KEKBにおける振動測定と解析		
	山岡 広(素核研)		1
(2)	超伝導ソレノイド電磁石用冷凍機の運転および保守管理		
	根本 靖久(物構研)		5
(3)	ビームシャッター外部開閉操作機構の開発		
	斉藤 裕樹(物構研)		10
(4)	カートリッジヒーターを用いた真空炉の製作		
	原 和文(加速器)		13
(5)	SuperKEKB 用超伝導電磁石の巻き線治具の製作		
	東 憲男(共通)		16
(6)	KEKmail での迷惑メール対策		
	押久保 智子(共通)		24
(7)	ILC計画のためのニオブ製 9 セル超伝導空洞		
	矢戸 寿郎(加速器)		29
(8)	STFの低電力高周波源の整備		
	片桐 広明(加速器)		35
(9)	技術とのかかわり		
	鈴木 善尋(素核研)		38

VIBRATION MEASUREMENTS AND FEM ANALYSIS FOR THE KEKB-IR

Hiroshi Yamaoka, Mika Masuzawa, Ryuhei Sugahara, Yasunobu Ohsawa
High Energy Accelerator Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、KEKB電子・陽電子ビーム衝突型加速器を用いたBファクトリー実験を行ってきたが、KEKB加速器の性能向上を目的として、SuperKEKB加速器の設計・建設が進められている。この計画では、KEKB加速器で記録したルミノシティの値を約40倍高めることを目標とするため、垂直方向ビームサイズをKEKB加速器と比べて数十分の一にする予定である。

このため、床面の過大な常微振動や装置からの大きな機械振動は衝突頻度の低下を招くことから、KEKB衝突点付近にあるマグネット支持システム及びその床面での振動レベルを測定し振動特性の調査を実施した。また、有限要素法を用いて測定値との整合性の検証をおこない、SuperKEKBでのマグネット支持システムの設計にいかすことにした。

本報告では、これら測定及び解析の結果について報告する。

KEKB における振動測定と解析

1. はじめに

KEKB 加速器にとって衝突頻度(ルミノシティ)の大きさは物理実験の上で非常に重要な項目である。このルミノシティを向上させる方法の一つとして、ビームサイズの極小化があげられる。垂直方向の大きさはトリスタン加速器では $\sim 10\mu\text{m}$ であったが、KEKB 加速器になるとそれが $1\mu\text{m}$ まで小さくなった。次期計画の SuperKEKB では更に小さく 50nm 程度になる予定である。

もし床面や機械振動によるノイズが大きい場合、振動の影響により衝突頻度が損なわれてしまう可能性があり、衝突頻度向上のためには振動レベルの把握及び許容値以下への抑制やフィードバックが必要になってくる。

このためにまず床面や各機器上での振動レベルの測定をおこない、それを分析することで振動の大きさや特徴を把握すると共にその原因を調査した。また、モーダルインパルス試験によりマグネット支持システムの固有振動数やモード形状を測定した。

一方で、有限要素法を用いた振動解析を行う事で床面振動に対するシステムの応答レベルを計算し、測定された振動特性との比較をおこなった。

2. 振動測定の概要

3.1 KEBB 衝突点付近の構造

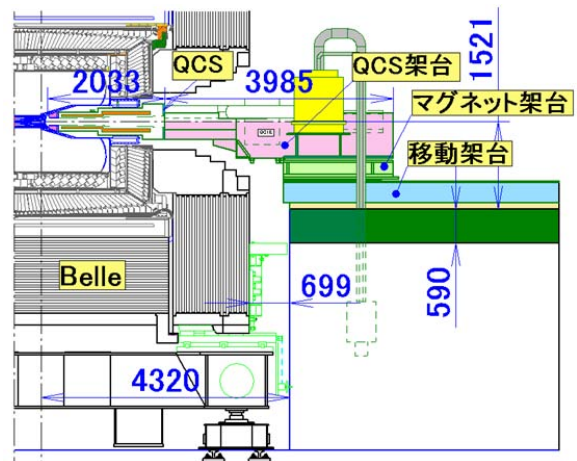
KEKB 衝突点付近の構造を図 1 に示す。KEKB フロアは Belle 検出器の両端に位置しており、検出器フロアより約 4.2m 上方にある。ビームラインのレベルは地下約 10m である。この部分に最終収束電磁石 QCS や QC1 電磁石が両側に配置されており、それらは QCS 架台に取り付けられている。この QCS 架台は移動架台と取り合うためにマグネット架台に取り付けられて、これらで一つのマグネット支

持システムを構成している。また、メンテナンス時は Belle 検出器内部にアクセスする必要がある事からこのシステムはビーム軸方向に後退できる構造になっている。

3.2 振動測定

この測定で用いられたセンサーは特許機器(株)のサーボ式加速度計(MG-102)で感度は $0.1\sim 400\text{Hz}$ で $1\text{gal}=1\text{V}$ である。データロガーは(株)小野測器のDS2000を用いておこなった。現場では振動レベルのみ測定し、データ解析は後からおこなった。サンプリング周波数は 256Hz である。

測定した項目は、床面及び機器各部での振動レベルとその特徴、BelleII 検出器の空調機の影響及びQCS 電磁石冷却時の振動への影響である。他にもトンネルの両端での振動の相関等を測定したが、本報告では省略する。



3.3 データ解析方法

データの解析は MatLab を用いておこなった。まず現場で 5 分間の振動データを採取したあと、データ解析として、測定データを 75% のオーバーラップをかけながら 8192 個のデータに分割し、それにハニングの窓関数をかけた。それを高速 FFT で周波数領域に変換したあと平均化をおこなった。そのデータから振幅のパワースペクトラム密度及び積分振幅を求めた。

3. KEBB 衝突点付近振動測定結果

3.1 振動レベルと特徴

床面で測定された振幅のパワースペクトラム密度を図 2 の上図及び QC1RE での振動レベルを図 2 の下図に示す。3 本のグラフはビーム軸に対して直角方向、ビーム方向そして垂直方向を表している。

QC1RE のデータを見てみると、このマグネットは QCS 架台上に取り付けられていてこの架台自身も別の架台に取り付けられていることから床面の振動と比べてレベルが拡大している。その他には、0.3Hz 付近に緩やかに盛り上がっている水平方向のピークがあり、3Hz 付近では垂直方向にレベルが高くなっているのがわかる。また、10~20Hz 付近にもピークを見る事ができた。これらは一般にそれぞれ、潮汐の影響 (Microseismic)、地盤の固有値及

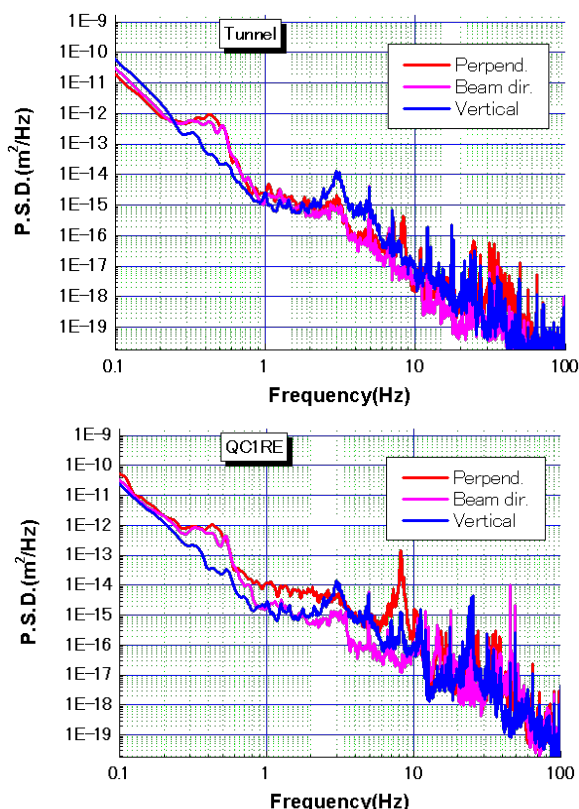


図 2 : マグネット支持システムでの振動測定結果 (上図: KEBB 床面上、下図: QC1RE 上での測定値)

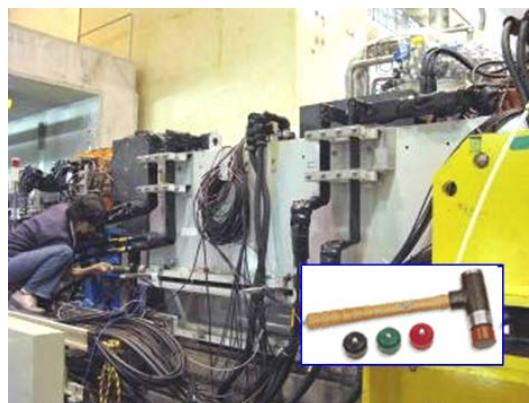


図 3 : モーダルインパルステスト試験風景。

び交通の影響といわれている。また、この地点での独特のピークとして 8 Hz 付近でも測定された。また、このピークは床面が一番小さく上方に行くほど拡大された。

3.2 モーダルインパルステスト

先の章で架台の振動で 8 Hz 付近に独特のピークが観測されたと報告した。このため、図 3 にしめすようなモーダルインパルス試験をおこない、この支持架台の固有振動数とモードシェープを測定した。

測定ではピエゾ式加速度計 1 個を QCS 架台上に取り付け、先端にロードセルのついた専用ハンマーを用いて各ポジションを叩いた。これにより入力した加振力とピエゾセンサーでの応答加速度の関係から応答関数を求めた。その後、各加振点での応答関数を専用のソフトで解析する事でシステムの固有振動数とモードシェープを測定した。

この結果、図 4 のような 8 Hz 付近では支持架台全体が横揺れしている事を測定した。この原因はマグネットシステムの一つとして一番底部に移動架台があるが、これは床面に取り付けられたリニアガイドに固定され、ビーム軸方向への移動を可能にしている。リニアガイドと固定部は非常に小さいギャップではあるが、このギャップが横揺れを起こしていると考えられる。

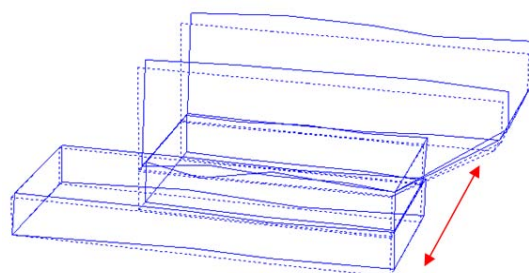


図 4 : モーダルインパルス試験結果。第 1 次固有振動数でのモード形状を示す。横方向に揺れていることが確認された。

4. 支持システムに与える振動の影響

4.1 空調機の影響

衝突点から約 10m ビームラインと直角方向に離れたところに Belle 検出器の信号を取り込む収集小屋があり、ここに空調機が取り付けられている。この空調を運転している時はかなりの騒音が発生することから、システムの振動特性に大きな影響を与えるのではないかと考えた。そこで、この空調設備を On にした場合と OFF にした場合でどの位、振動に違いがあるかを測定した。

測定は KEKB 衝突点の両側のトンネル内でおこなわれ、センサーを電磁石の上と床面にセットし、空調を ON にした場合と OFF にした場合の、振動レベルの違いと相関を測定した。

結果として、地面の固有値である 3 Hz 付近で若干の違いがあるものの、双方に大きな違いはみられなかった。

4.2 マグネット冷却時の影響

マグネットを冷却する際に振動特性に影響がないかどうかを調べた。

加速度センサーを日光側ではマグネットの上の 3 方向に置き、大穂側はマグネット横の冷却管の上に

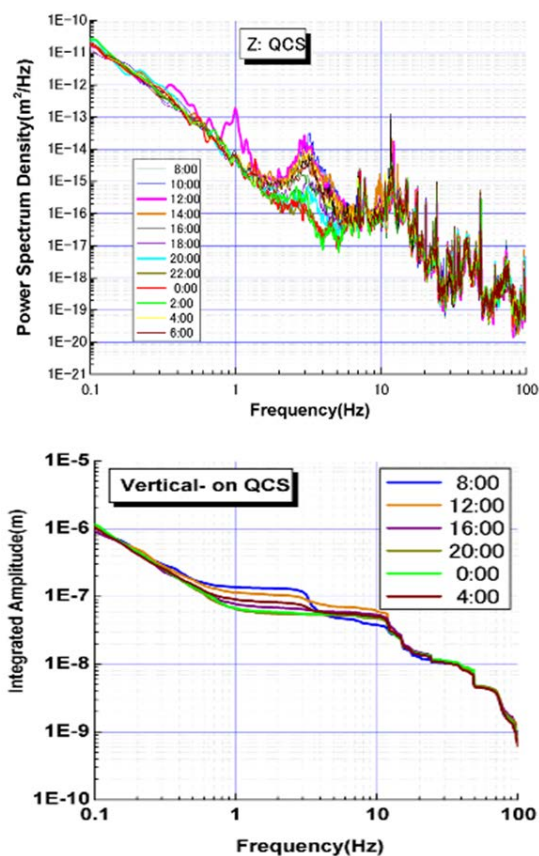


図 5 : QCS マグネット冷却時の振動測定結果。(上図：パワースペクトラム密度、下図：積分振幅)を表す。

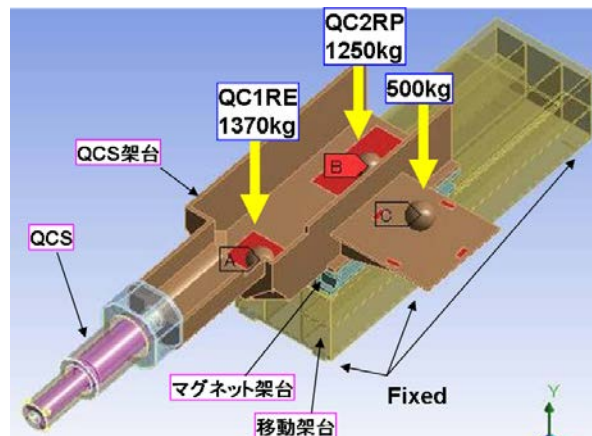


図 6 マグネット支持システムのモデル図

置いて測定した。測定は 1 時間毎に 10 分間測定され 24 時間続けられた。この間に、マグネットの冷却がされた。

日光側マグネット上で測定された上下方向の振動データを図 5 に示す。地盤の固有値である 3 Hz 付近でピークを見る事ができるが、日中は振動レベルが大きく、深夜ではレベルが小さくなっている。これは交通量の影響が大きく関係している事がわかる。

他に昼の 1 2 時に 1 Hz 付近でピークが見られた。この原因について冷却データ、ログブックや地震の有無を調べた。その結果、この時間に地震の発生

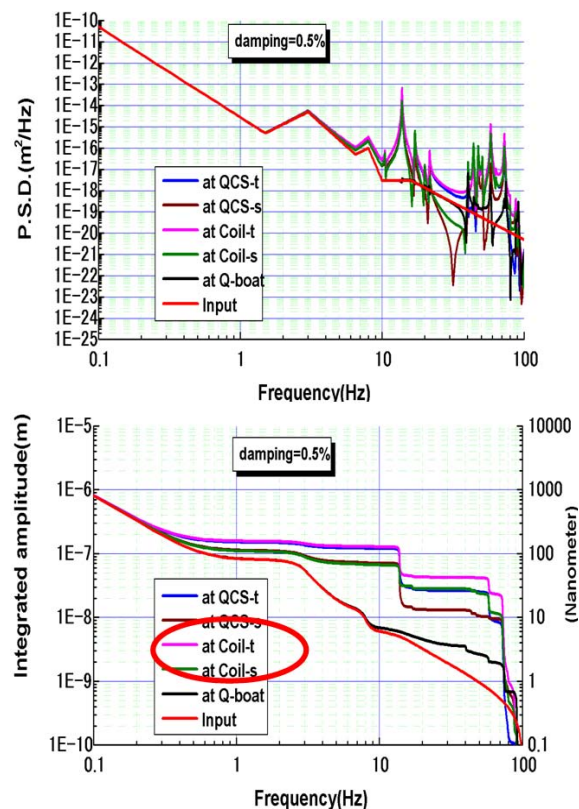


図 7 QCS マグネット各部での床面振動に対する応答計算結果。

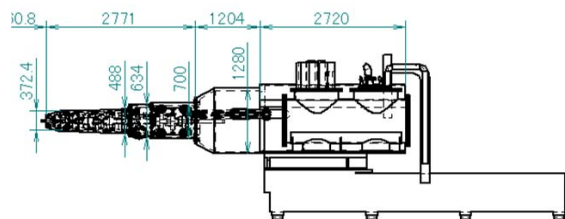


図 8 : SuperKEKB のためのマグネット支持システム。

記録がないことから地震の影響では無い事がわかり、冷却の影響と考えられた。冷却記録をみると冷却開始が昼 11 時頃から開始され、12 時頃には冷媒を流している途中で 14 時には冷媒を停止していることがわかった。このため、1 Hz 付近のピークは冷媒を流した影響と考えられる。しかし、冷却前と冷却後と比べてみると、双方では振動特性に大きな違いはないと考えられる。

図 5 の下のグラフは積分振幅を示す。上図のパワースペクトラム密度を周波数の高いところ（この場合 100Hz）から積分して作ったものである。この結果、積分変位は 1 Hz 以上では約 200nm と計算された。

4. 振動解析による応答計算

4.1 KEKB 支持架台の振動解析

マグネット支持システムの振動解析をおこない、測定データと比較することで整合性を調べた。もしこの結果、双方に良い整合性があった場合、新たに設計・製作する支持システムでも振動特性を予測できると考えた。

振動解析は「ランダム振動解析」をおこない、支持システムをモデル化した後に測定された床面の振動データ（周波数－振幅のパワースペクトラム密度）を拘束点に入力し、任意の位置での応答（パワースペクトラム密度）を求めた。

解析モデルを図 6 に示す。減衰定数は 0.5% とし、コイルとクライオスタットとのサポート部はバネ定数を計算してスプリング要素でモデル化した。荷重条件は、自重の他に支持架台に搭載されているマグネット荷重を定義した。材質はコイル部は銅、クライオスタットはステンレス及び架台は鉄とした。

計算結果を図 7 に示す。縦軸は振幅のパワースペクトラム密度で横軸が周波数である。赤の実線が入力された床面での振動を表す。この入力値に対する各部の応答を他の実線で表す。応答は、0Hz の時は入力値すなわち地盤の振動と同じであるが、第 1 次固有振動数に向かって徐々に拡大されていく。この系の 1 次固有値は 14Hz と計算されたのでここで振幅は最大値となる。振幅は減衰定数大きく関係している。このあと、それぞれの固有値の周波数で振動はピークを示す。また、振幅の大きさは周波数が高

表 1 : FEM による振動解析のまとめ

QCS	項目	値	値
New QCS	固有値	36Hz(1 次)	61Hz(2 次)
		92nm	39nm
	積分振幅	>1Hz	>10Hz
現 QCS	固有値	14Hz(1 次)	20Hz(2 次)
		150nm	120nm
	積分振幅	>1Hz	>10Hz

くなるにつれて急激に減少している。図 5 の測定値と比べると同じところに固有振動数のピークを見る事ができ、積分振幅の値も双方で 200nm 前後となり、解析によって振動特性を予測できることがわかった。

4.2 SuperKEKB 支持架台の振動解析

SuperKEKB のためのシステムの設計にあたっては、固有振動数をできるだけ高くするようにした。このことで、積分振幅を小さくする事ができるためである。図 8 に現在考えている SuperKEKB のためのマグネットシステムを示す。現在のマグネット支持システムでは船のような形の支持形状にしているが、これを筒状にすることによって剛性を向上させ、その結果、固有値を向上させた。

このことで、積分振幅を大きく低下させることができるという計算結果をえた。固有値は KEKB では 17Hz であったが約 36Hz まで増加した。計算のまとめを表 1 に示す。今後、更に支持形状の最適化をする予定である。

4. まとめ

SuperKEKB 計画では垂直方向のビームサイズが非常に小さいことから、衝突頻度向上のために振動レベルの大きさが問題になる。このため種々のスタディをおこなった。

この結果、空調機の影響は非常に小さく、電磁石冷却の影響も冷却初期を除けば影響が無い事が確認された。振動の測定では典型的な 3 つの振動ピーク以外に 8Hz 付近でのピークが測定され、このピークは上部の支持構造にいくにしたがって、振動レベルが大きくなっていった。モーダルインパルス試験をおこなって原因を調査したところ、それはマグネット支持システム全体の横揺れモードであることが確認された。

電磁石先端での振動は約 200nm であることが測定された。また、振動解析をおこない測定値との整合性をチェックした。この結果、測定値と計算値は比較的一致し、このことは SuperKEKB マグネット支持システムの設計に大いに生かす事ができると考えられる。

今後、構造の最適化及び低振動化に向けた検討をおこなっていく予定である。

超伝導ソレノイド電磁石用ヘリウム冷凍機の 運転および保守管理

根本 靖久（所属 物構研ミュオン）

1. はじめに

J-PARCミュオン施設では3 GeV陽子がグラファイト標的に衝突する際、原子核の陽子および中性子との核反応からパイ中間子が創られ、このパイ中間子が崩壊してミュオンが得られる。こうして生成したミュオン粒子をできるだけ多く実験エリアまで導くためには、超伝導ソレノイドによる大きな磁場が必要となる。超伝導ソレノイドは長さ50 cmボア径12 cmの12連の超伝導コイルからなり、中心磁場5 Tを6 mにわたって発生させることが可能である。その強い軸方向の磁場で飛行中のパイ中間子を閉じ込めながらミュオンに変換させる。超伝導コイル（NbTi線材で構成）のまわりは2重の温度シールド（6 Kシールド、80 Kシールド）が配され、外部からの熱侵入に対しての保護となっている。

このような高磁場を発生させる超伝導ソレノイド電磁石の冷却回路は上流部の6つのコイル（ $\mu 1$ コイル）と下流部の6つのコイルおよび6 Kシールド（ $\mu 2$ コイル）の2つに分けられている構造になっている。その冷却にヘリウム冷凍機システムが使われる。

2. 冷却原理

ヘリウム冷凍機システムは図1に示すように、ヘリウムガスを圧縮機で高圧（0.85 MPa G）にし循環させ、タービン、JT弁にてソレノイド電磁石に供給して冷却するシステムである。

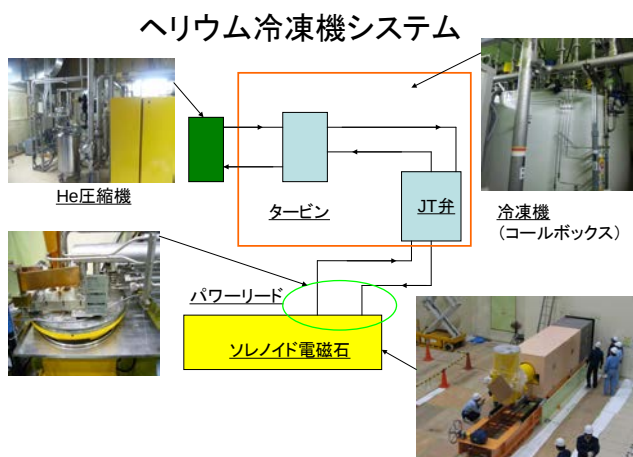


図1 ヘリウム冷凍機システム

超伝導ソレノイドは冷却回路上、前述の2つ（ $\mu 1$ および $\mu 2$ コイル）に分けられている。さてここでまず冷却方式を説明するために必要なウォームリターン、コールドリターン、シリーズとは何かについて述べておきたい。

冷却の初期においては、超伝導ソレノイドに供給して戻ってきたヘリウムはまだ温度が高いため。そのため冷凍機の高圧部と低圧部間の熱交換器を通過させず、太い配管で圧縮機に直接戻したほうが、冷凍能力が高まる。このような冷却経路をウォームリターンと呼ぶ。この際 $\mu 1$ および $\mu 2$ コイルはヘリウム風量を最大限にするため並列に経路は組まれている。

次に徐々に全体の系が冷えて来た後には、超伝導ソレノイドから戻ってくるヘリウムは十分冷えているので、供給側経路のヘリウムを冷却するために使用できる。そのため熱交換機を通して冷やせるように経路を変更する。これがコールドリターンである。

コールドリターンに変更した後も、超伝導ソレノイドを並列に冷却する経路から直列に冷却する経路にバルブをコントロールして変更する。この温度領域ではすでに循環ヘリウムガスの温度は低く、その密度は室温時に比べ大きくなっているため、直列経路にしても冷却能力は十分にある。また最終的には超伝導ソレノイド内でのヘリウムの圧力を0.5 MPa G以上にとることで、ヘリウムの気液混合状態（いわゆる超臨界状態）に相転移させて冷却能力を飛躍的に高めることができる。このような経路をシリーズと呼んでいる。

次に冷却の実際をバルブ操作と各計測点の温度との関係から述べてみたい。

ヘリウム圧縮機をスタートさせマグネット接続運転を開始すると、マグネットバルブCV814（ $\mu 2$ コイルウォームリターン）、CV815（ $\mu 1$ コイルウォームリターン）がすぐに100%全開になる。これにより、冷凍システム全体の暖かいヘリウムガスは直接圧縮機へ戻される。 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818、 $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が50 Kになるまで行われる（図2）。ここで $\mu 1$ の流れを青色、 $\mu 2$ の流れ

をピンク色、バルブの開を水色、バルブの閉を赤色で示す。

スタートから47時間 ($\mu 1$ コイルTE818の場合)、さらにそれから2時間30分後に $\mu 2$ コイルTE817が50Kになる。($\mu 2$ コイルは、6Kシールドコイルを持っている為、冷却時間が掛かる。) 50Kに達する時間は、ソレノイドが以前の運転で既に冷却されている場合はさらに短縮される。

常温から定常状態まで

・280Kから50Kまで ウォームリターン

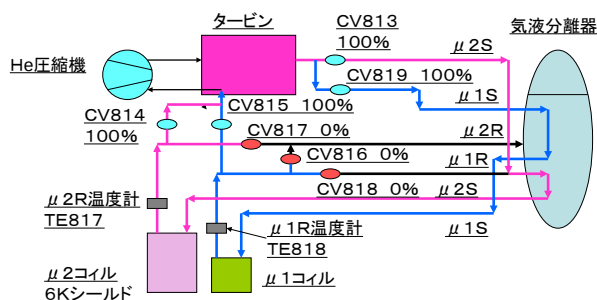


図2 ウォームリターン冷却回路

次に、コールドリターン冷却回路に関して図3に示す。 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818がTE817より先に50Kになるとバルブが切り替わる。CV815 ($\mu 1$ コイルウォームリターン) が100%から98%と徐々に閉まり始めると、CV816 ($\mu 1$ コイルコールドリターン) が0%から2%と徐々に開き始める。最終的にはCV815が0%、CV816が100%になる。途中、双方の開閉度が足して100%になる様に行われていく。50%になるまで2時間ぐらいを要しその後、4時間30分～5時間を要しCV815が0%、CV816が100%になる。TE818が先に50Kになってから、2時間前後を経て $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が50Kになると、同様にバルブが切り替わる。CV814 ($\mu 2$ コイルウォームリターン) が100%から98%と徐々に閉まり始めると、CV817 ($\mu 2$ コイルコールドリターン) が0%から2%と徐々に開き始める。最終的にはCV814が0%、CV817が100%になる。これで、コールドリターン冷却回路の完成である。この時の、 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818が12Kで、 $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が14Kである。

・50Kから13Kまで コールドリターン

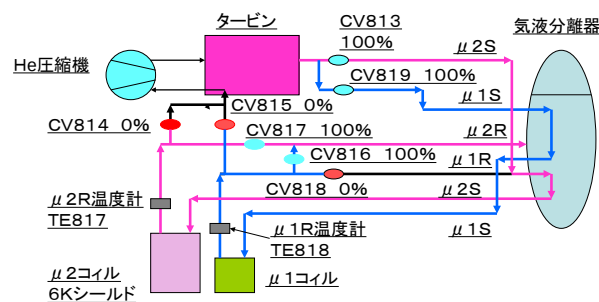


図3 コールドリターン冷却回路

シリーズ冷却回路に関して図4に示す。

コールドリターン冷却回路のままでは、TE818、TE817が13K前後で何日何時間経過しても変化が無く4Kにならない。さらに冷却するには、シリーズ冷却回路がある。CV816が100%から98%と徐々に閉まり始めると、1分後、 $\mu 2$ 送り供給バルブCV813が0%閉へ、 $\mu 1$ 戻りバルブCV818が100%開へ同時に作動する。CV816が100%から0%閉（所要時間14分）、CV813が0%閉、CV818が100%開に達成時刻は、13分で3つのバルブは同時に各々の開閉度になる。この時、 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818が9Kで、 $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が10Kである。後は、待つだけである。その後、3時間30分要してTE818が4Kで、TE817が5Kに達成する。この値が、通常運転の状態である。

・13Kから4.0Kまで シリーズ

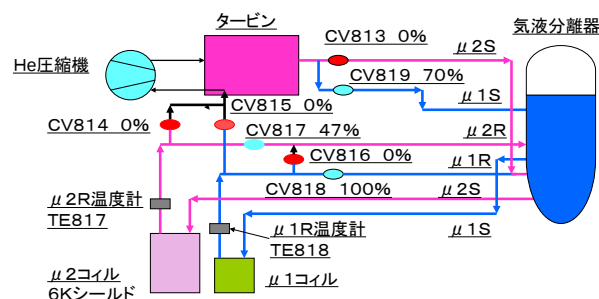


図4 シリーズ冷却回路

常温から冷却をスタートして、図5より $\mu 1$ コイル戻り温度TE818（左側紫色）、 $\mu 2$ コイル戻り温度

TE 8 1 7（右側灰色）がグラフから伺えられるように、順調に冷えて行く。4 K完成間際、バルブユニットのPIA-S 6 R 2の圧力が0. 5 5MP a GになるようにCV 8 1 7開閉度を定常状態で5 4%になるように調整する（図6 超伝導ソレノイド電磁石廻り参照）。

PIA-S 6 R 2とは、 $\mu 2$ コイル戻りの圧力であり。CV 8 1 7を絞り過ぎては圧力が高く、ソレノイドの冷却能力が低下し、開き過ぎては、気液分離器の液体ヘリウムの量を一定に保持できない。この値の関係は試行錯誤の結果、冷凍処理能力のもっとも高い最適な圧力とバルブ開閉度の関係である。

4. 2 K～4. 3 Kで、ヘリウムガスが超臨界状態になる。この時、現場コールドボックス周辺から「シュー、カラカラ、シュー、カラカラ」と、音が聞こえ3 0分近く続き、鳴り止む。すると4 Kに成り、気液分離器にヘリウム液が徐々に溜り始め通常1時間3 0分（場合によって3時間）かって、6 0%まで溜る。常温から冷却完成が3日間要す。

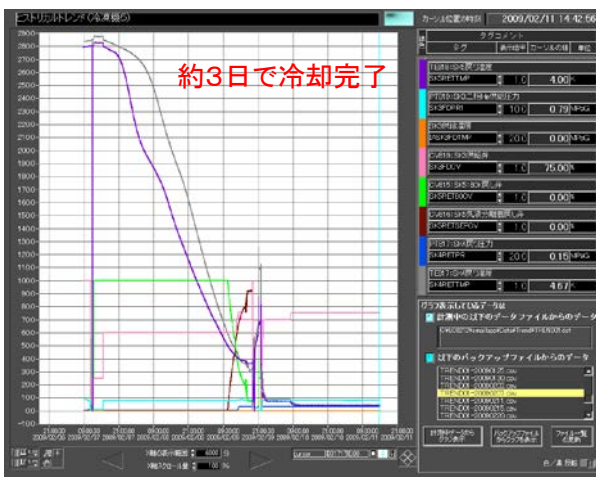


図5 冷却完成曲線

冷凍機により冷却が完成したので、パワーリード(+、-)に、液体ヘリウムを流す。パワーリード(+、-)に、安定した5 0 L／minの流量を得るために、図7ヘリウム冷凍機PC監視画面を参照、CV 1 5 2開閉度を調整する。

3. 運転および保守管理

次に、付帯設備や装置、日常点検等、保守管理について説明する。冷凍機運転は概ね以下の手順で行われ、詳細については別途取り扱いマニュアルが整備されている。

- ・ 電源ブレーカー確認（He 圧縮機、制御系、UPS）
- ・ バッファタンク圧力の確認（ヘリウムガスの状態）
- ・ ヘリウム圧縮機起動
- ・ マグネットへの接続（供給バルブ開放）
- ・ ヘリウム冷凍機起動（冷却開始→3日間要す）
超伝導ソレノイド用直流電源の電源供給

尚、これらの状態は全てPC監視画面上で確認できる。超伝導ソレノイド用直流電源PC監視画面の横に電流可変用のリモートコントローラー（図8参照）を設置してある。電流設定は今のところ、表面ミュオン4 0 A、崩壊ミュオン3 4 0 Aにて供給している。

超伝導ソレノイド電磁石廻り

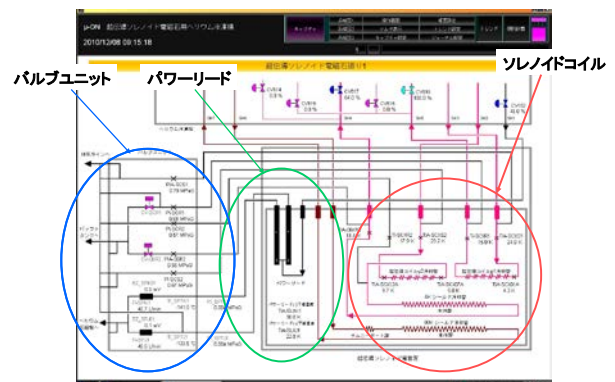


図6 超伝導ソレノイド電磁石廻りPC監視画面

ヘリウム冷凍機監視画面

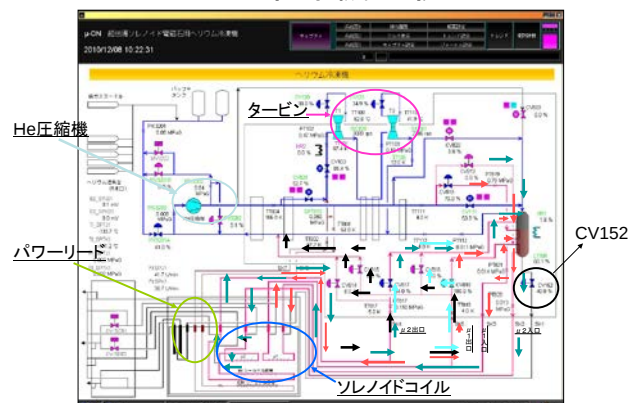


図7 ヘリウム冷凍機PC監視画面

超伝導ソレノイド用直流電源



図8 電流可変用リモートコントローラ
及び超伝導ソレノイド用直流電源

一方、保守管理においては以下のように定期的な巡視確認を実験室内外に行っている。

冷凍機システムの保守・管理（実験室内）

- ・ ヘリウム冷凍機 PC 監視画面の確認（頻繁）
- ・ トレンドグラフ各 11 画面。圧力、温度、流量等のチェック
- ・ PC 監視画面の現在（リアルトレンド）、過去（ヒストリカルトレンド）から異常を確認
- ・ コールドボックスの状態の巡視（図 9）
- ・ 漏れ、圧力（計空）、バルブの開閉度、冷却水温度（タービン）、パワーリード（図 10）、およびバルブユニット（図 11）の状態確認



図9 パワーリード



図10 バルブユニット



図11 コールドボックス

冷凍機システムの保守・管理
（実験室外）

- ・ 屋外ヤード（図 12）のバッファタンクの巡視。圧力状態を確認（漏れをチェック）。
- ・ 配管、継ぎ手（フランジ等）チェック。
- ・ カードル及び送気台の巡視。漏れ、配管、継ぎ手状態確認。圧力計確認
- ・ 第2ヘリウム圧縮機棟（図 13）の巡視。圧縮機、制御系（電源、ブレーカー）、配管、継ぎ手、バルブ等の確認。圧縮機、オイルセパレーターからの

油漏れ、冷却水の漏れ確認

- ・ 冷却塔の巡視。各モーター（水ポンプ、散水ポンプ、ファン）の動作、状態（錆び具合）、ファンベルトの状態（張り、傷等）、全体の状態、冷却水洩れ確認。
- ・ 保守備品の補充等



図1 2 屋外ヤード：冷却塔（左）、カードル（中央）、バッファタンク2基（右）



図1 3 第2ヘリウム圧縮機棟：オイルセパレーターおよびバルブステーション(左)、ヘリウム圧縮機(右、黄色)

4. 問題点と今後の課題

立ち上げ時は毎回、冷凍機が定常状態に達するまでの時間、過程が異なる。また、トレンドグラフのバルブ開閉度と実際の開閉度が異なる事がある。これはバ

ルブ自体の問題（個体差）と推測されるが、この時、運転継続可能か判断しなければならない。冷却に時間が掛かり過ぎたり、バルブの切り替わりに時間が掛かり過ぎたりするときは、停止して急遽、業者を呼んで修理して、立ち上げたケースもある。

運転中、毎回、パワーリードへの流量が不規則になる。トレンドグラフの流れを見てみると、 50 L/min で一定状態の時に、突然減少し始めたりする。この場合、回復させる為にバルブの操作が必要になる。原因、前触れもなく起こる現象に今の所未然に防ぐ方法が無い。バルブ、配管等の詰まりが考えられるが、はっきりしない。通常、監視体制は、日中担当者及びミュオンで実施しているが、その他は現場における監視のみならず、物質生命科学実験施設中央制御室及びニュートリノ制御室において冷凍機の状態が常時ネットワークを通じてモニターできるシステムを構築し、万全の体制がとられている。

謝辞

日頃より、低温グループには多大なる御支援、御助力を頂き、今日迄ヘリウム冷凍機の運転が順調に行われて来た。この場をかりて、深く感謝と敬意を表したい。これからもご支援・御協力の程、御願い申し上げる次第である。

ビームシャッター外部開閉操作機構の開発

○齊藤 裕樹、濁川 和幸、小菅 隆（物質構造科学研究所）

1. 概要

物質構造科学研究所放射光実験施設の実験用ビームラインには安全に実験が行えるよう、ビームラインインターロックシステム (BLIS) [1]が設置され、インターロック集中管理システム (CCS) によって統合的に管理されている。これまで、実験者がビームシャッター (MBS、BBS) 開閉をする際には必ず BLIS のステーションコントローラ (OPC) の操作パネル (図 1 参照) を使用しなければならなかったが、高度な実験が行えるよう実験計測システムからビームシャッターを開閉したいという要望があり、安全に外部からビームシャッターを開閉できるシステムが必要となった。本報告はビームシャッター外部開閉操作機構 (External Mode) の詳細である。

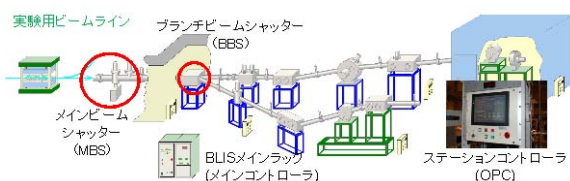


図 1 実験用ビームライン概要図

2. システム概要

BLIS は Programmable Logic Controller (PLC) で動作しており、それぞれの PLC は Serial・Ethernet 変換が可能な N Port を介してインターロック専用 LAN に接続されている。PF-AR には 3 つの実験ホールがあり、それぞれに CCS が設置されている。各 CCS もインターロック専用 LAN に接続されて運用されており、今回の技術を導入した NE-3A がある NE 棟実験ホールにも NE-CCS という CCS が設置されている。CCS は簡易メッセージ配信システムである STARS (Simple Transmission and Retrieval System) [2] [3]を基本として構築されており、Logger Client で各 PLC のステータスとコマンドの流れをログニングしている。今回のシステムは、インターロック専用 LAN にビームシャッターを外部から操作する為の PC (外部操作作用 PC) を接続してネットワーク経由で BLIS の PLC をコントロールする構成となっている。外部操作作用 PC は実験用ビーム

ラインのコントロール専用 LAN に接続されビームラインの主要コンポーネントを操作する可能性もある。インターロック専用 LAN の安全を確保する為に、2 系統の LAN に接続可能な OpenBlockS を用いて 2 つの LAN を物理的に切り分け、OpenBlockS 上に STARS のブリッジ用プログラムを搭載することでコントロール専用 LAN に接続された不特定多数の PC からのビームシャッター操作を防止し、限られた PC のみビームシャッターのコントロールをすることとして、一定の安全の確保に役立てている。(図 2 参照)

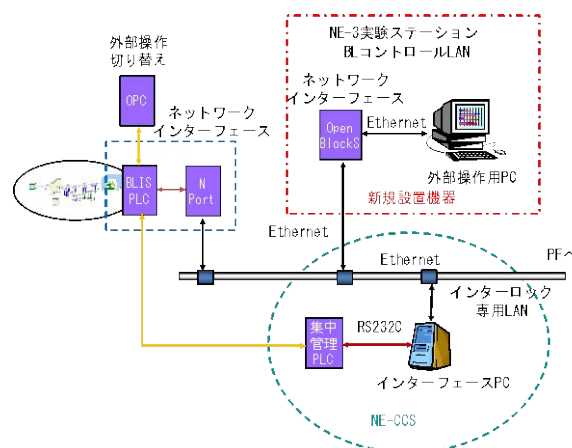


図 2 システム接続図

3. ソフトウェア構成とコマンドの流れ

今回の技術を達成するためのソフトウェア構成は図 3 の通りであり、STARS を使用して外部操作を行う構成とした。STARS はその中心となる STARS サーバーと各種クライアントからなるが、今回はサーバーと 5 個のクライアントで構成されている。また、BLIS 側についてはハードウェアの改造を行う事無く PLC プログラムの変更のみで External Mode に対応している。それぞれのサーバー、クライアント間でのコマンド(表 1 参照) の流れは下記の通りである。

- 1) 外部操作 Client から送信されたコマンドは Client Bridge に送られる。(図 3 の 1 参照)
- 2) Client Bridge は送られてきたコマンドが許可された PC からのもので、さらに許可されたコマンドかをチェ

ックした後、サーバー経由で外部操作 Interface に送信する。(図 3 の 2,3 参照)

3) 外部操作 Interface は送られてきたコマンドを再度チェックした上でコマンドを変換し、サーバー経由で PLC Interface に送信する。(図 3 の 4,5 参照)

4) PLC Interface は送られてきたコマンドに対応したデータを PLC に送信する(図 3 の 6 参照) この時コマンドがステータス等の返り値を要求されたコマンドだった場合には、返り値が逆の順で外部操作 Client に送られる。

5) Logger Client でこれらのコマンドの流れは常にロギングされている。

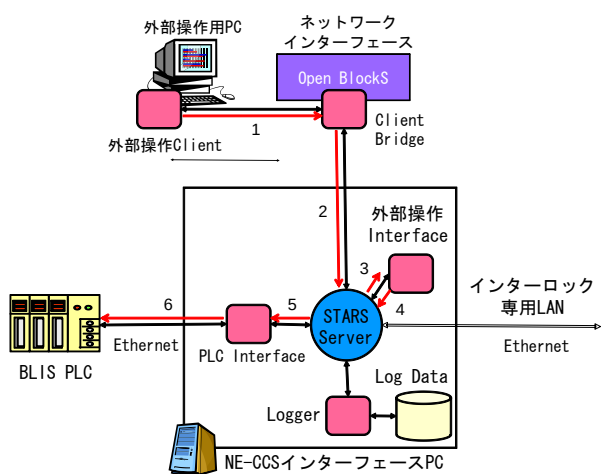


図 3 ソフトウェア構成の概略図

コマンド名	内容
NE03.ExternalMode	BLIS外部操作モードの状態信号
NE03.BLISMain.Status	ビームラインMainラインの状態信号
NE03.BLISA.Status	ビームラインAラインの状態信号
NE03.MBS.Status	MBSの状態信号
NE03.MBS.OnReady	MBS開可能信号
NE03.MBS.OpenRequest	MBS開要求信号
NE03.BBSA.Status	BBS Aの状態信号
NE03.BBSA.OnReady	BBS A開可能信号
NE03.BBSA.OpenRequest	BBS A開要求信号

表 1 コマンド一覧

4. セキュリティーの確保

External Mode を開発するにおいて重要なことは、インターロック本来の機能として重要な安全を確保しつつ、External Mode という利用者の利便性実現することである。具体的には、許可された PC からのみコマンドを受け付ける等の STARS のセキュリティーだけでなく外部操作 Client、Client Bridge と外部操作 Interface それぞれにセキュリティーに配慮した作りとした。ま

た、実際のビームシャッター操作する BLIS 側でも誤動作防止の為に一定の操作が必要な外部操作モード

(External Mode on) に切り替えないと(図 4 参照) 外部からのビームシャッターのコントロールは受け付けない様にして、2 重 3 重の安全性を確保している。

External Mode 時は安全のため OPC では特定スイッチ以外は操作不可になり、External Mode であるかないかの状態が運転当番や他のビームラインの実験者からも判断しやすい様に既存の LED を利用した表示(図 5 参照)を行っている。当然のことながら、当該ビームラインで少しでも異常が発生した場合には外部操作の条件が解除(図 6 参照)される。

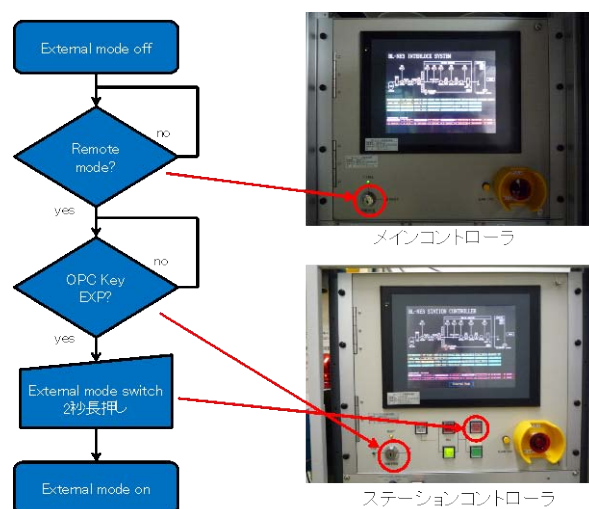


図 4 External mode にする時の操作

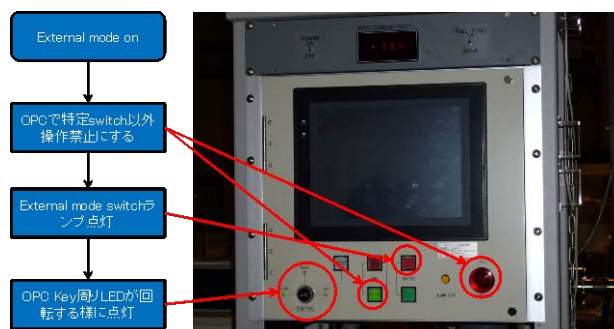


図 5 External mode 時の OPC の変化

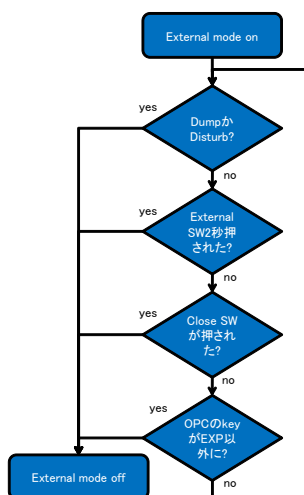


図 6 External mode が off になる条件

5. 外部操作クライアント

今回作成した外部操作 Client (図 7 参照) は外部からビームシャッター操作をする以外に Auto mode という機能を持ち、条件が満たされれば自動的にシャッターを開けることが可能となっている。(図 8 参照)

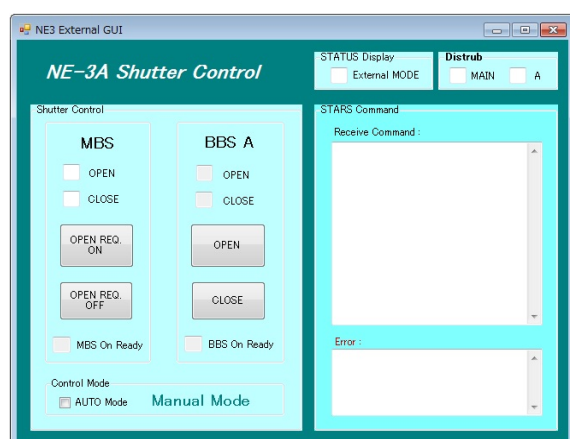


図 7 外部操作 Client の GUI

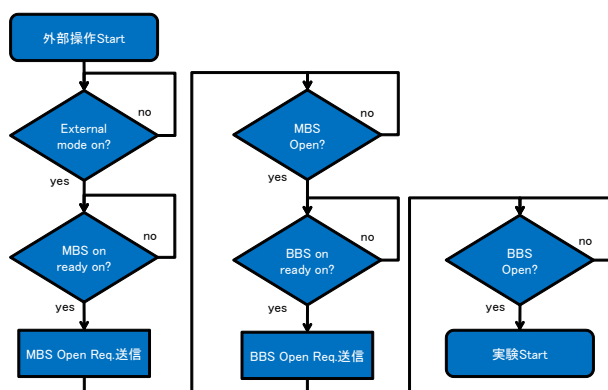


図 8 Auto mode 時の基本動作

6. まとめと今後

今回のシステムが導入された事により、本来であればステーションコントローラでしか出来なかったビームシャッターのコントロールが実験計測システムから出来るようになった。これにより、自動での実験を進めていくことが可能になり、実験計測システムが必要時に正確にビームシャッターを制御することで、実験の安定性が確保され、スループットの上昇にもつながっている。さらには、リングの運転モードがユーザー運転に切り替わると即時にビームシャッターを開けることが可能となり、ビームライン光学系の負荷が安定するという複次的な効果も得られ、放射光ビーム供給の安定化に大きくつながっている。

現在は限られたビームラインでのみ、本システムが導入されているが、今後は PF ビームラインの標準仕様として拡張されることが望まれている。このためには、各リング、ビームラインで世代の異なるビームラインインターロックシステムのハードウェア、ソフトウェア両面からの整合性の統一等が課題として挙げられる。今後、システムが熟成するにつれ、順次他のビームラインへと導入される予定であるが、これにより要求の異なる様々なビームラインにおいて、供給される放射光ビームの信頼性が格段に向上し、より高度な実験が可能となることが期待される。

参考文献

- [1] 最新のビームライン・インターロックシステム,平成 19 年度核融合科学研究所技術研究会(2008)
- [2] 計測・制御用簡易メッセージ配信システムの開発,平成 13 年度技術研究会(2001, 東北大学)
- [3] [http:// stars.kek.jp/](http://stars.kek.jp/)

カートリッジヒーターを用いた真空炉の製作

原 和文（所属 加速器第三研究系）

1. はじめに

私たちグループは、cERL に使用される超伝導加速空洞や国際リニアコライダーの超伝導加速空洞を約 2K の温度まで冷却するための過冷却液化ヘリウム冷凍機の開発、製作を行なった。その過冷却液化ヘリウム冷凍機の構成装置である熱交換器は、超伝導加速空洞が納められている液体ヘリウム槽から減圧ポンプ等により戻ってくる約 2K のヘリウムガスの顕熱を利用して約 4K の液体ヘリウムと熱交換を行ない約 2K の過冷却液体ヘリウムを作る。これは、超伝導空洞を冷却するために使用された寒冷を無駄に捨てることなく、出来るだけ回収することで冷却システム全体を小さくすることが可能となり性能の良い熱交換器を開発することは、非常に重要である。そこで、出来るだけコンパクトで熱伝達が非常に良い、銅パイプと銅フィンを使用した熱交換器の開発を行なった。

熱交換器の大きさは、 $\phi 82\text{mm} \times$ 高さ 261mm と比較的小さいものであり、銅パイプと銅のフィンを使用するので製作の過程において真空銀ロウ付けが必要となる。このような熱交換器の真空銀ロウ付け作業を業者へ依頼する場合、依頼業者が所有している真空炉は、この熱交換器サイズに比べ大体において大きな真空炉であり、真空炉を占有してロウ付けを依頼しようとすれば、熱交換器の大きさに見合わない作業料金を請求されることが予想される。また出来るだけ安価に真空銀ロウ付けを依頼しようとすれば、同じような真空銀ロウ付け依頼品が、依頼業者が運転する真空炉いっぱいに入る量まで待ってから真空炉を運転するので、納期が長くなってしまう。さらに性能の良いものを開発するためには、ショートサンプルでの真空銀ロウ付けを繰り返し行なって銀ロウ材のぬれ具合や、銅パイプとフィンの接具合を確認する必要があるため、実際に業者へ依頼するのは無理がある。

以上の理由から、製作中の熱交換器が真空銀ロウ付け可能な、操作が単純、簡単に扱いやすい真空炉が求められた。しかし、一般的に真空炉に用いられる加熱ヒーターは、発熱体の常運転温度の高いもので、割合大きな真空炉用しか見つからず、我々が求めている小さい真空炉に利用できる物が見当たらなかった。そこで、比較的手に入りやすいカートリッジ・ヒーターを使用すること、その加熱ヒーター本体の固定方法を工夫し 800℃以上の高温まで真空炉を加熱できること、断線やショートが起こりにくい加熱ヒーターを使用すること、メンテナンスしやすいこと、出来るだけ小さい装置にす

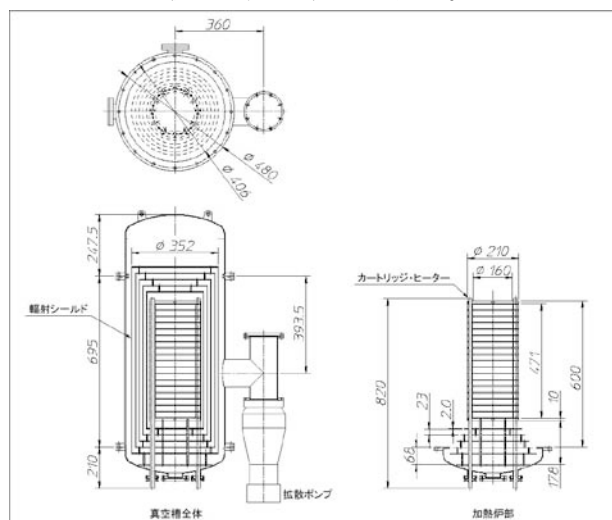
ることを目標として真空炉を製作したので報告する。さらに、その真空炉を使用して真空銀ロウ付けを行なった熱交換器を紹介する。

2. 真空炉概要

図－1 に真空炉概要図を示す。真空炉外槽全体の大きさは、 $\phi 406\text{mm} \times$ 高さ 1180 mm（架台、真空排気装置含まず）、加熱炉は、 $\phi 160\text{mm} \times$ 高さ 470 mm の大きさがあり、対象としている熱交換器を真空ロウ付けするのに十分な大きさを持っている。輻射シールドは、加熱炉を囲むように置かれ、SUS304 製の 5 層構造となっている。輻射シールド上下方向は 2mm、周方向は 1.5mm の板厚を使用し各々層の内側には、ディンプル加工した SUS304 製 0.1mm 薄膜を 10 層したものをつけている。

加熱ヒーターは、一般的に入手しやすいカートリッジ・ヒーター $\phi 15.8\text{mm} \times 820\text{mm}$ （1500W/240V）6 本を使用した。ヒーター内部は外筒内に発熱体と絶縁材が封入されている。非発熱部に SUS 製フランジを溶接して、真空槽へフランジで固定する。加熱ヒーターの出力調節は、スライダックを使用し電圧を手動で調整して行なうので操作が単純で確実である。

電源とスライダックの間に絶縁トランスを設けて、加熱ヒーターがショートしても電源盤内ブレーカーが落ちないので、他装置に影響を与えない。また仮に加熱ヒーターの交換が必要になった場合は、真空炉下部にフランジで固定する設計としたので比較的簡単に取替えが出来る。



図－1

真空炉の冷却は、加熱ヒーターと同じ方法で固定された 2

本の冷却パイプ（φ1/2"×1mm）を冷やすことで真空炉を冷却する。そのパイプの炉内端部側は、溶接により閉止されており真空炉底部からパイプ内側に 1/8" のパイプを奥まで差し込み、そこへ計装用エア導入し冷却パイプを冷やして真空炉内を冷却する。

温度モニターは、真空槽底部フランジからカレントスルーで加熱炉に導入し中心部付近に1箇所、Kタイプの温度計を取り付けて炉内温度をモニターしている。

真空排気装置は、エドワーズ社ロータリーポンプ(RV8 0.45KW)と拡散ポンプ(100/300 0.65KW)で構成し、クリスタルイオンゲージ 2 台をラインに取り付け圧力をモニターしている。

3. 熱交換器

図-2に真空炉でロウ付けを行った熱交換器の概略を示す。約4Kの液体ヘリウムは、過冷却液化ヘリウム冷凍機内のタンクから熱交換器に供給され、コイル状になったφ6mm銅パイプを約7m通過する間に減圧ポンプ等により戻ってくる約2Kのヘリウムガスと熱交換を行い約2Kに過冷却される。過冷却された液体ヘリウムは、同じく過冷却液化ヘリウム冷凍機内の2Kタンクに貯められ超伝導加速空洞を冷却するために利用される。

熱交換器本体は、リン脱酸銅パイプ(φ6mm×1mm)を約φ75mmのコイル成型したものに、0.5mm厚の無酸素銅板から打ち抜き成型を行なったフィンを銅パイプ 1 ピッチ当り約6枚、合計180枚を真空銀ロウ付けしてある。銀ロウ付けされたフィン面積は、約1200cm²であり使用する銀ロウ材は、JIS Bag-8 相当品を用いた。

熱交換器の制作方法は、まず事前にフィンの焼き鈍しを行い加工硬化を取り除く。次にφ0.4mm の SUS ワイヤーを使用して銅パイプにフィンを縛り付ける。その時、ワイヤー状になっている線径φ0.8mm の銀ロウ材を同時に固定する。フィンを固定するときの注意点として、フィンの銅パイプに当たる部分を指でしごく事により、銅パイプの形状にフィンの当り面を変形させてから SUS ワイヤーで緊く締付ける。これは、銀ロウ材が浸透していく部分の隙間を出来るだけ小さくするため、銀ロウ材の使用量を少なくすると共にパイプとフィンの接触を良くすることに有効である。

銅パイプにすべてのフィンを固定した後、フィンが脱落するのを防ぐためにフィン先端にある穴を貫通するように両端に M4 ネジを立てた SUS 棒を通し、ナット間寸法 約 260mm になるように両端をダブルナットで締め固定する。

真空銀ロウ付け作業は、熱交換器本体中心に通した SUS 棒を使って真空炉内に吊し固定した後、輻射板、真空炉の上

部蓋を取り付け真空銀ロウ付け作業を開始する。十分真空炉内が冷えたのを確認した後、熱交換器本体を取出す。銅パイプにフィンを縛り付けた SUS ワイヤーは、ニッパー等で切断し取り除く。銅パイプ両端は、後から TIG 溶接を行なうため、変換用の $\phi 1/4"$ SUS パイプを銀ロウ付けしてから SUS 製の $\phi 84.7\text{mm}$ 外筒パイプに挿入する。熱交換器本体の位置を確認し、 $\phi 1/4"$ SUS パイプを外筒パイプから外へ引出し、ICF34 フランジを TIG 溶接して完成する。

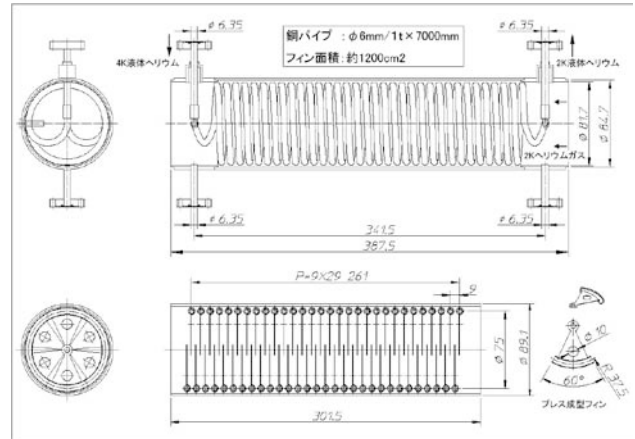


图-2

4. 真空炉運転

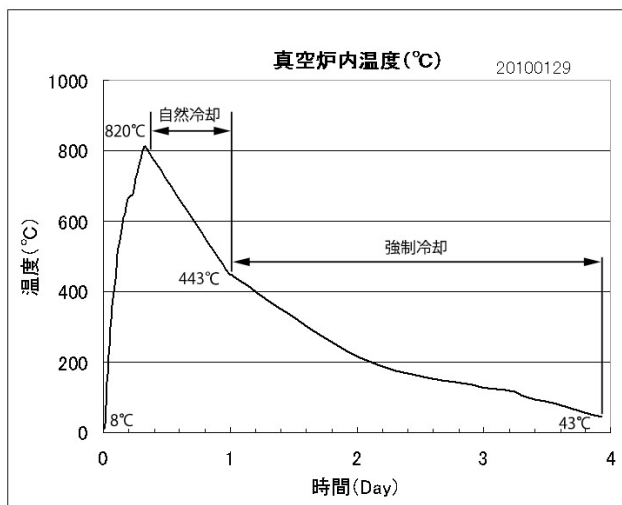
表-1に真空炉の加熱から冷却までの炉内温度のグラフを示す。真空炉の運転は、真空炉の加熱炉部にロウ付けを行う熱交換器を固定し、上部の輻射シールド、上部フランジの順番で蓋をして真空引きを行う。この時の熱交換器に使用した銀ロウ材は、JIS Bag-8を使用した。この銀ロウ材の液相温度は、約 780℃なのでロウ付け温度は、800℃以上で 30 分間保持とした。真空炉の圧力が安定したのを確認後、スライダックで加熱ヒーターの電圧を 70V に調整して真空炉を加熱する。このとき全加熱ヒーター出力は、約 770W であった。炉内温度 600℃を越えたところで目標温度 800℃を大きく超えないように温度モニターに注意して段階的に加熱ヒーター電圧を 75V~80V に上げていく。加熱開始から約 7 時間半で目的温度の 800℃を超える。そこから 800℃以下にならないように加熱ヒーター電圧を調節し保持をする。

800℃を 30 分間保持した後、加熱ヒーター電圧を下げ、真空炉内温度を冷却するが、このとき急激に加熱ヒーター電圧を下げてしまうと加熱ヒーター内の発熱体が、断線やショートを起こしやすい事が分かっている。

そこで、加熱ヒーター電圧を 50V まで 1 時間程度かけて徐々に下げていく。その後、加熱ヒーターの電圧を 0V にして翌日まで約 1 日間、自然冷却する。この日は、外気温が低く 44.3℃まで炉内温度が下がった。次に冷却パイプに計装用

エアーを流して、熱交換器が取り出せる温度まで真空炉内を冷却する。

計装用エアーで約 3 日間冷却後、真空炉内温度が約 40℃ になったところで、真空引き装置を停止して大気リークを行い、熱交換器を取出して運転を終える。



表－１

5. まとめ

現在まで真空炉は、3 度の銀ロウ付けのテスト、6 台の熱交換器を銀ロウ付けし、その他に 3 度の銅製品のアニールを行った。特に運転上の問題は発生せず、加熱ヒーターの不良も認められない。

今までに製作した真空炉は 3 台あり、今回紹介した真空炉は、その中で一番大きなものである。以前製作した真空炉の加熱ヒーターも同じタイプのものを使用したけど、800℃まで真空炉を加熱すると加熱ヒーターの絶縁不良や断線が多く発生した。この加熱ヒーターの内部常用設計温度は、870℃であり真空炉内温度を 800℃まで加熱すれば、内部常用設計温度は、優に超えていると想像できる。しかし、このタイプのカートリッジ・ヒーターを使用しなければ、今回設計目標とした小さな真空炉を製作することが出来なくなり熱交換器の開発が遅れてしまう。そこで、以前製作した真空炉に使用して断線、ショートしてしまった加熱ヒーターを分解し、何処で何故断線しているかを調べ、真空炉を 800℃まで加熱しても断線やショートを起こさない加熱ヒーターの操作方法を検討した。

加熱ヒーター外筒内には、発熱体と絶縁材が入っていて、発熱体が動かないように絶縁材がぎっしりと充填されていた。また発熱体は、ほぼ同じ箇所断線していた。以上、加熱ヒーターを分解観察した結果、発熱体が断線する原因は、真空炉冷却時に加熱ヒーター出力を急激に下げたとき、加熱ヒーター外筒と発熱体の温度差が大きくなり乖離し、発熱体

が外筒に比べて大きく収縮することで、発熱体が断線してしまうと考えた。

そこで真空炉を冷却する時に、加熱ヒーターの出力を、時間をかけて徐々に下げるようにしたところ、加熱ヒーター発熱体の断線やショートの故障が無くなった。さらに加熱炉部の加熱ヒーターは、加熱ヒーター外筒表面と加熱炉内温度差が小さくなるように鉄製のパイプ (SS400) に挿入され、そのパイプは、表面積を増やすために 17 段のフィンと接触している。

以上の結果、断線やショートを起こしていた加熱ヒーターは、断線を起こさない真空炉の運転方法、表面積の増加をしたことで、メーカー推奨温度以上の温度でも使用できることが可能となり、銀ロウ付けに必要な温度の 800℃まで、真空炉を加熱することが出来た。さらに、この加熱ヒーターが使えることで、加熱炉部を占める加熱ヒーターのスペースを小さくすることが可能となり、真空炉全体をコンパクトにまとめることが出来た。

今後は、加熱ヒーターの故障が起きないような真空炉の運転方法が分かったので、はじめに温度調節機とトライアックで加熱、冷却運転の自動化を行い、最終的に簡単なプログラマブル・コントローラーで真空装置の運転開始、真空炉の加温、冷却、大気リークまでの運転を行えるよう目指すつもりである。

Super KEKB 用超伝導電磁石の巻き線治具の製作

東 憲男（所属 機械工学センター）

1. 目的

現在、KEK では KEKB 加速器のアップグレード計画 Super KEKB^[1]に向けて、ビーム衝突点で使用される超伝導電磁石の設計検討が進められている。この超伝導電磁石システムは 8 台の主 4 極電磁石から構成され、その 1 つの超伝導電磁石 QC1RP の R&D を行う為に、これまでより小型の巻き線機を製作した。当該の巻き線を製作するに当たって、市販の回転台機構を改造する事で、主要な構造設計の省力化を図った。本報告は、巻き線機的设计製作について行う。

2. QC1RP 超伝導電磁石

図 1 に示すように 8 台の超伝導 4 極電磁石は、衝突点の左右に設置されたクライオスタットに各々 4 台ずつが組込まれる。この超伝導電磁石 (QC1RP) は、Super KEKB の衝突点に最も近くに設置される超伝導 4 極電磁石である。磁石の断面形状を図 2 に示す。磁石の巻き線に使用する超伝導線材は、キーストン角のある矩形のケーブル (裸線寸法 : 0.93mm x 2.5mm) とした。超伝導コイルは 2 層構造で設計されており、この線材を巻き芯マンドレル^[2]に 1 層巻いた上に、2 層目を重ねて巻くダブルパンケーキ巻き線を採用した。各磁石の仕様を表 1 に示す。

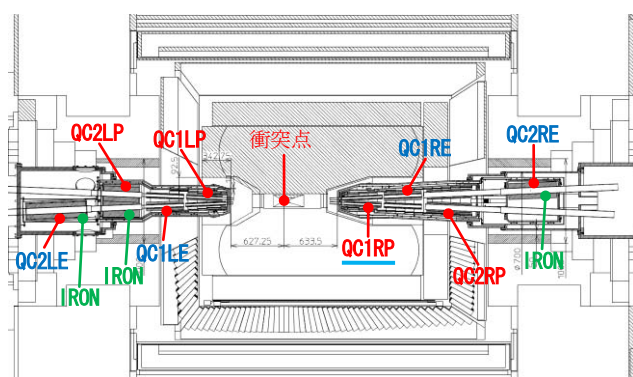


図 1 Super KEKB の基本配置図 (筑波実験室)

3. 巻き線治具の設計および製作

現在の巻き線機は、KEKB^[3]用アクティブシールド磁

石の R&D (全長 0.58m)・磁場長 1m モデル磁石 (SSC^[4]用) や 3.63m (J-PARC^[5]用) および 5m (TRISTAN 5T Dipole^[6]用) の全長を持つ各磁石の製作に使用されてきた。本巻き線機は、全長 0.5m 前後の小型な磁石の巻き線用として、巻き芯マンドレル (以下、マンドレル) の全長に合わせて治工具等の詳細設計を行った。マンドレルの断面図を図 3 に示す。

磁石 名称	積分磁場 (T/m)m	磁場長 L m	磁場勾配 G T/m
QC2RE	設計中	設計中	設計中
QC2RP	10.92	0.350	31.21
QC1RE	26.22	0.360	72.91
QC1RP	22.43	0.3372	66.52
QC1LP	22.91	0.3372	67.94
QC1LE	26.03	0.360	72.38
QC2LP	設計中	設計中	設計中
QC2LE	設計中	設計中	設計中

表 1 衝突点用各磁石の仕様 (20110118 現在)

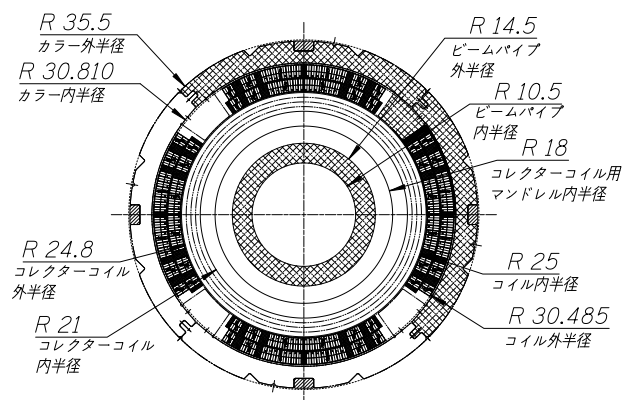


図 2 QC1RP 超伝導 4 極電磁石の断面形状

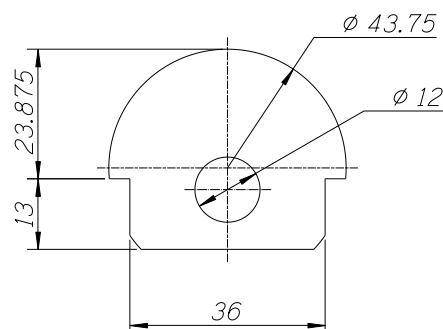


図 3 マンドレルの断面形状
(20100121 時点での R&D 版)

マンドレルは、コイルの内径（口径）基準となる為に、仕上げ外径 $\phi 43.75\text{mm}$ の丸棒から削り出した蒲鉾状の断面を持つ一本物とした。巻き線するコイル全長 340mm （QC1RP用）に対し、マンドレル全長を 400mm とした。また、表1に示す各磁石のコイル全長にも対応できるように取付アーム部に冗長性を持つ巻き線機とした。以下に、治工具部品等について述べる。

(1) コイル線材抑え

マンドレルの上に取付ける巻き線サドル（以下、サドル）の形状を図4-1に示す。トーションバネを用いた基本的な構造は、以前（Super KEKB用 R&D^[7]）と変更なく、超伝導線材の矩形寸法に合わせて各部品の小型化を図った。巻き線サドルの本体部品の製作に、新規に導入した CAD/CAM/CAE ソフト「CATIA V5（R19）」を用いた。この CAM 機能を用いて、NC データの出力とマシニング加工を行った。CATIA の CAM 出力画面およびマシニング加工を図4-2・図4-3に示す。また、コイル線材抑え治具部品を図4-4・図4-5・図4-6に示す（図1）。

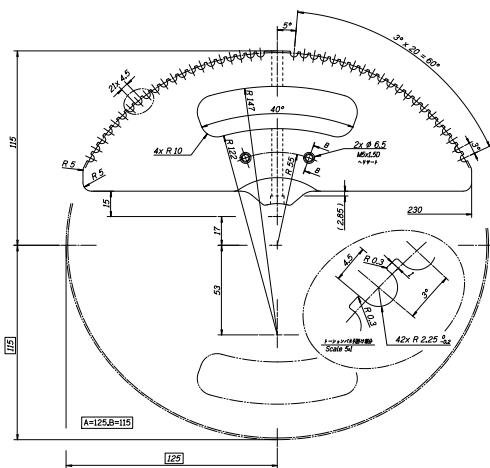


図 4-1 巻き線サドルの製作図

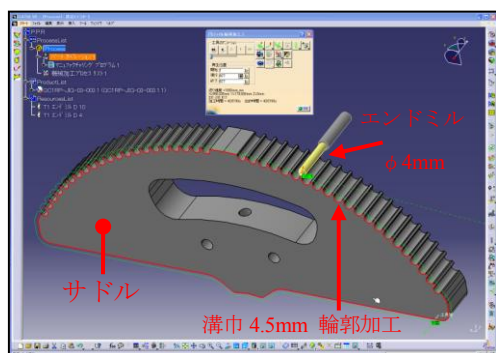


図 4-2 CAM 出力画面（CATIA）

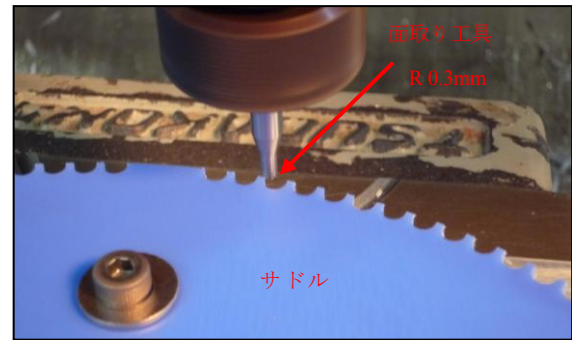


図 4-3 マシニング加工（サドル：8 個）

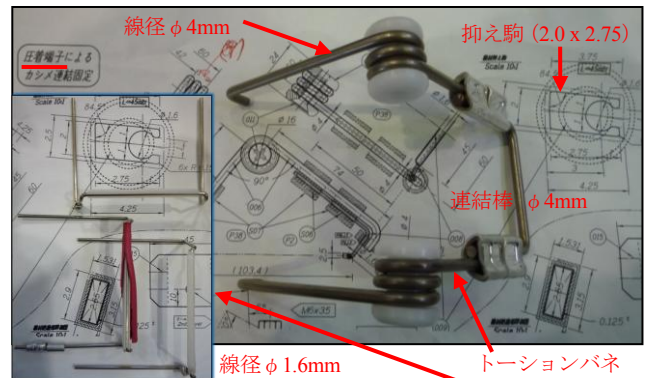


図 4-4 コイル線材抑え部品の組立（左図 L 型アーム）



図 4-5 コイル線材抑え治具（4 組）

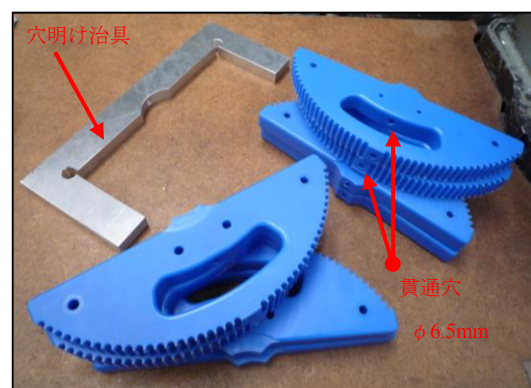


図 4-6 サドル部品の穴加工（各 4 個）

(2) 回転機構

マンドレルの軸を回転中心として傾けるチルト（正・逆反転）機構には、巻き線に必要なトルク（ $\geq 25\text{N} \cdot \text{m}$ ）と出力軸の回転速度（ $0 \sim 7.5\text{rpm}$ ）の仕様を十分に満足する電磁ブレーキ付きモータ（ 0.1kW ）を

選定した。また、駆動方法は2列のスプロケット・チェーン駆動を踏襲した。

水平面の回転台機構（以下、ターンテーブル）には、必要なトルク（ $\geq 250\text{N}\cdot\text{m}$ ）と出力軸の回転速度（ $0.2\sim 2.5\text{rpm}$ ）の仕様を満足する回転治具を改造した。

巻き線機の鳥瞰図を図5-1に示す。ターンテーブル（外径： $\phi 450\text{mm}$ ）の分解組込工程を図5-2・図5-3・図5-4・図5-5・図5-6・図5-7に示す。（図2）。

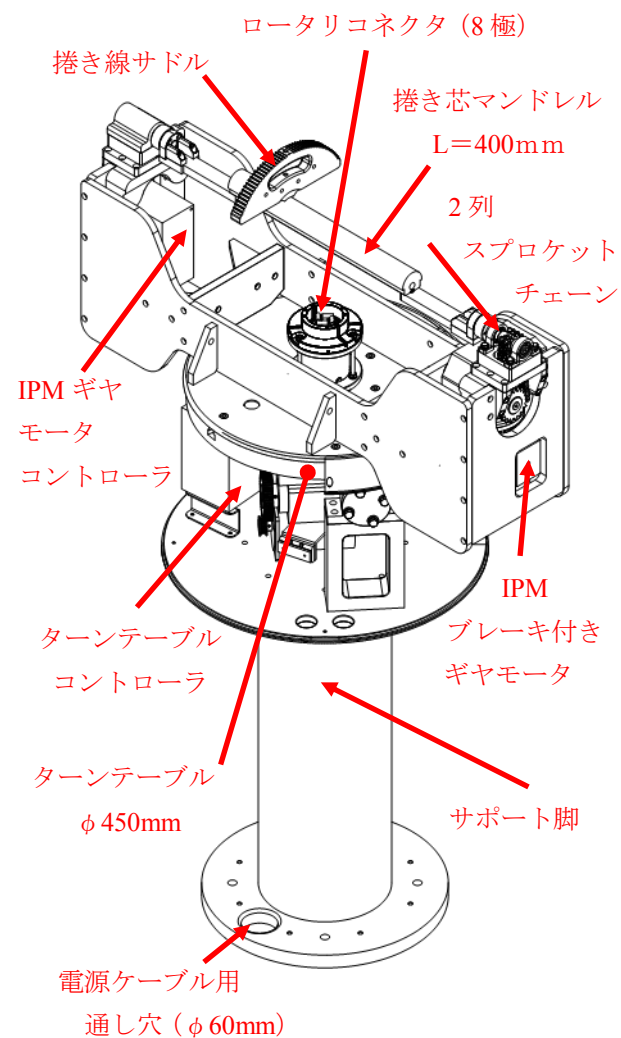


図5-1 巻き線機の鳥瞰図

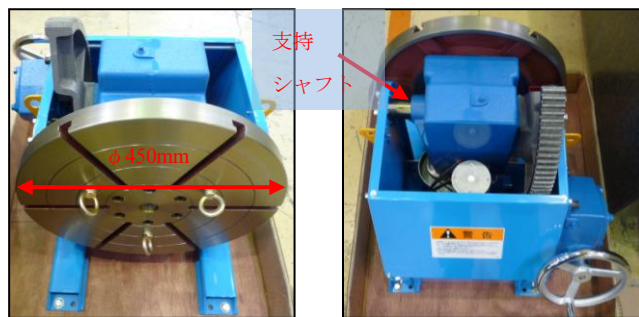


図5-2(左:前) 図5-3(右:後) 分解前のターンテーブル

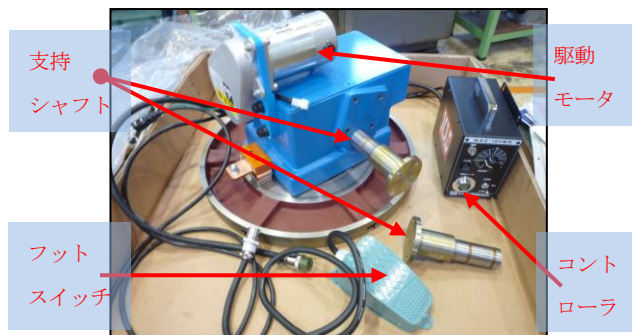


図5-4 ターンテーブル部品の分解取外し

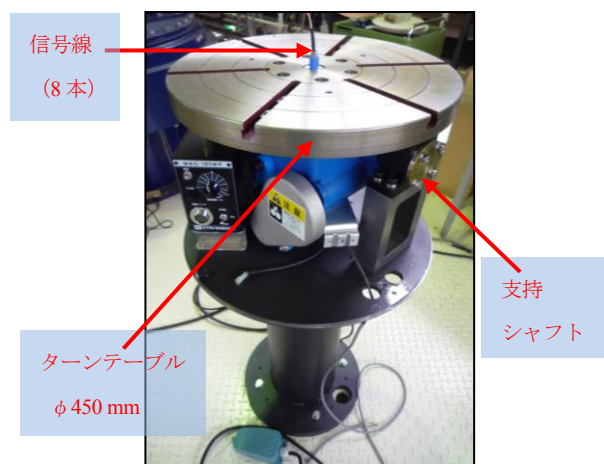


図5-5 ターンテーブルの組込

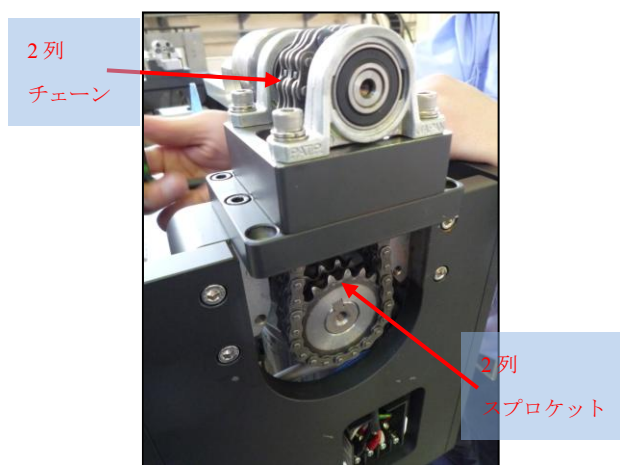


図5-6 2列チェーンの組込

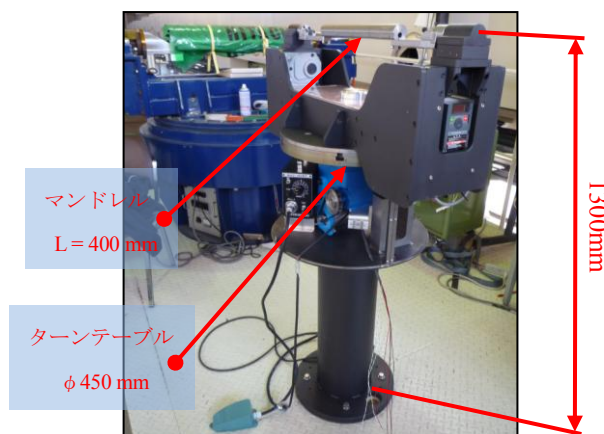


図5-7 マンドレルの取付

(3) ロータリコネクタ

ロータリコネクタ本体は、市販の 8 極ピンの製品を採用した。チルト機構用のモータ電源等の信号線（合計 8 本）をロータリコネクタの接続端子部まで導入する為に、ターンテーブルの回転中心軸（車軸）に貫通穴（ $\phi 15\text{mm}$ ）の追加工を行った。貫通穴追加工の影響を見積る為に強度解析（図 6-1）を行い、車軸として十分な強度を確保していると判断した。図 6-2 に中実の車軸を示す。また、ロータリコネクタの回転側に取り付くカップリング部品にスリット（巾 0.23mm）の追加工を行った。スリット加工図（スリット部の厚さ 3mm）を図 6-3 に、ワイヤカット放電加工によるスリット加工を図 6-4 に示す。本スリット部は、図に示すような二重の螺旋形状とし、ロータリコネクタ本体の回転軸部分に無理な力が加わらないように、十分な撓みを持つ構造とした。この解析結果（変形量）を図 6-4 に示す。カップリング部の接続配線（合計 8 本：写真は 4 本）を図 6-6 に示す。ロータリコネクタ配線経路（黒色破線表示）を図 6-7 に示す。

図 6-3 カップリングのスリット部（二重の螺旋）加工図（追加工：青色表示部）

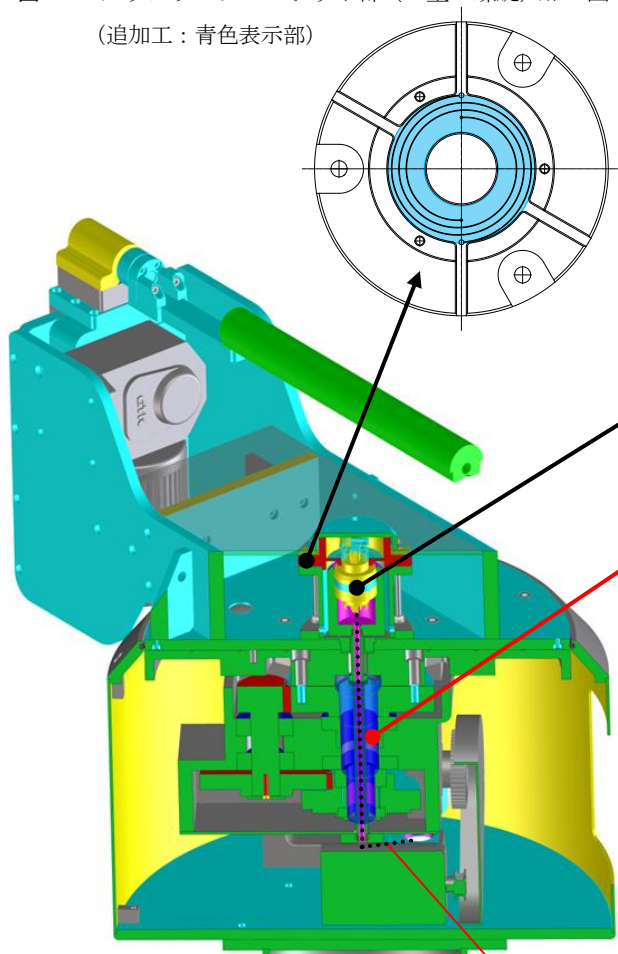


図 6-7 ロータリコネクタ配線経路図（黒色破線）

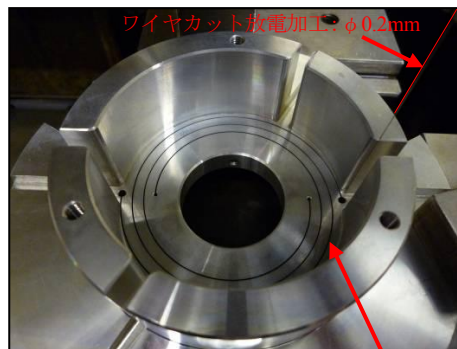


図 6-4 カップリングのスリット部加工

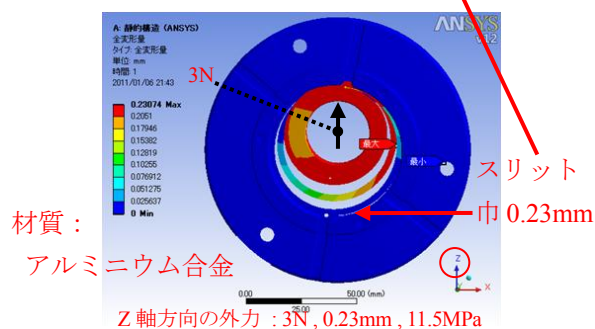


図 6-5 カップリングのスリット部の強度解析

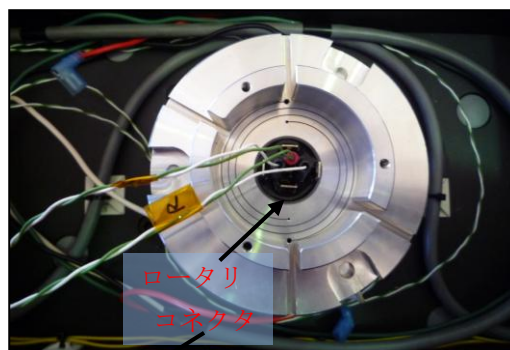


図 6-6 カップリング部の接続配線

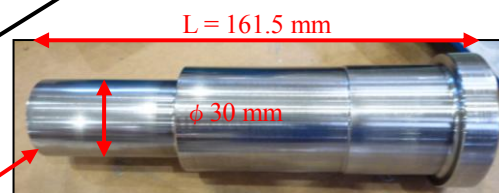
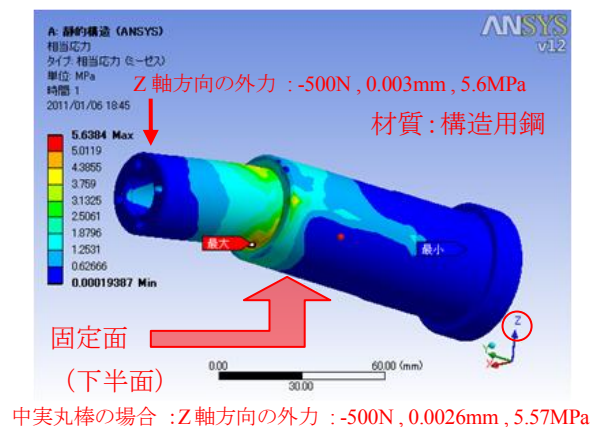


図 6-2 中実の車軸（貫通穴加工前）



中実丸棒の場合：Z 軸方向の外力：-500N, 0.0026mm, 5.57MPa

図 6-1 車軸貫通穴（ $\phi 15\text{mm}$ ）の強度解析

(4) 巻き線機全体のアセンブリ解析

各部分毎のアセンブリ解析を行った後に、巻き線機全体をアセンブリした状態での強度計算を行った。図 7-1 には、巻き線機の 3D アセンブリモデル図を示す。図 7-2 には、ターンテーブル上部の箱型構造部に補強リブを追加した場合のアセンブリ解析の結果を示し、変形量が最大となるマンドレル取付構造部分のアセンブリ解析の結果を図 7-3 に示す。

各部品間の接触は、完全固着^[8]（デフォルトの設定：ボンド）とし、アセンブリ全体が 1 つのパーツ構造物とした場合の解析結果を図 7-4 に示す。

巻き線機全体のアセンブリ解析の結果は、最大変形量：約 0.35mm で使用上問題無い範囲の値となった。また、実際の変形量はボルト締結部分の滑り等により解析結果よりも大きい値になると思われる。

外力は、500N の引張力で巻き線した場合とした。

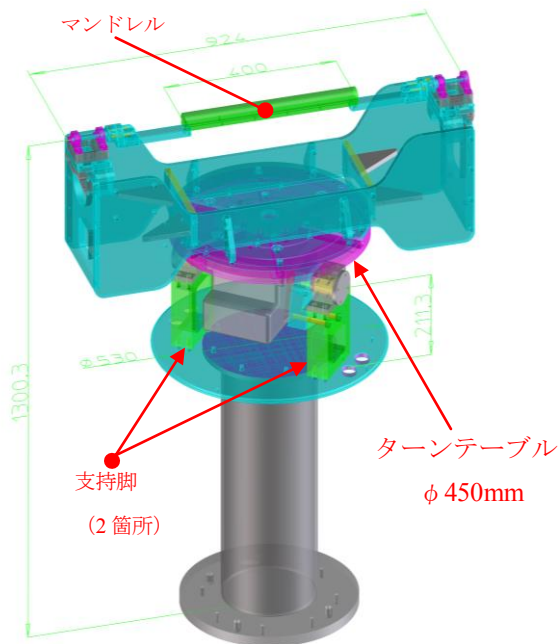


図 7-1 巻き線機のアセンブリモデル図

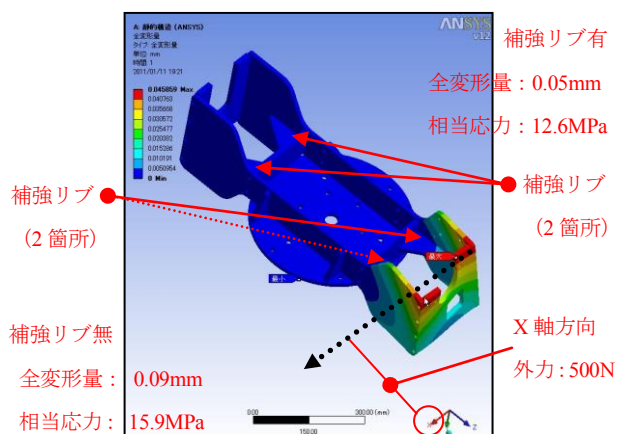


図 7-2 補強リブ有（無）のアセンブリ解析

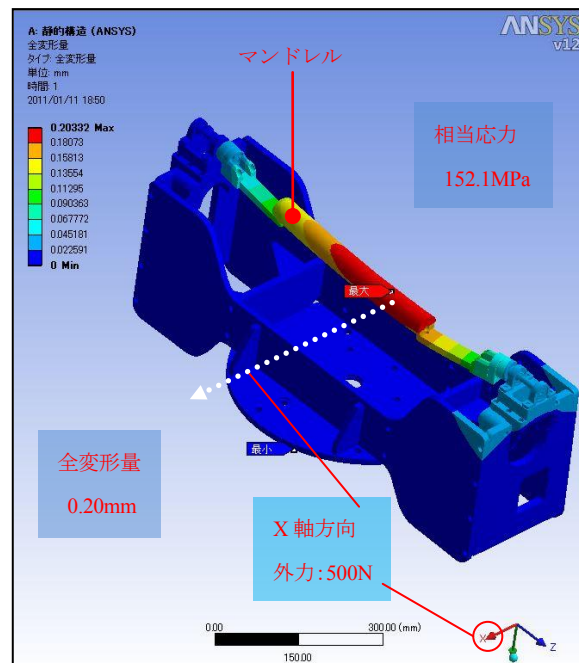


図 7-3 マンドレル取付部のアセンブリ解析

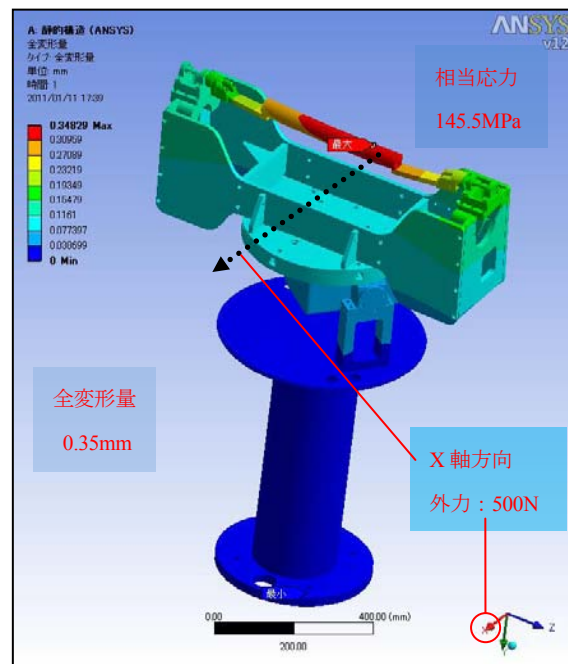


図 7-4 巻き機線全体のアセンブリ解析

(5) 巻き線機の製作組立

ターンテーブル部品の追加工の必要があり、また詳細な部品図が手に入らなかった為に、現物を分解して必要な箇所寸法測定を行った。ターンテーブル外枠のタップ穴位置測定（形状寸法の型取り）を図 8-1 に示す。実測値を設計図面に反映した。ターンテーブルの支持脚部品（2箇所）の固定面（図 8-2）には調整シム（最大 0.3mm）を入れて、ターンテーブル下面の水平出しを行った。コイル線材抑え治具の組立を図 8-3

に示す。巻き線機操作盤の組込を図 8-4 に示す。各回転軸の手元（リモート）操作盤を図 8-5 に示す。



図 8-1 寸法測定(左上図: 光明丹で型取り)

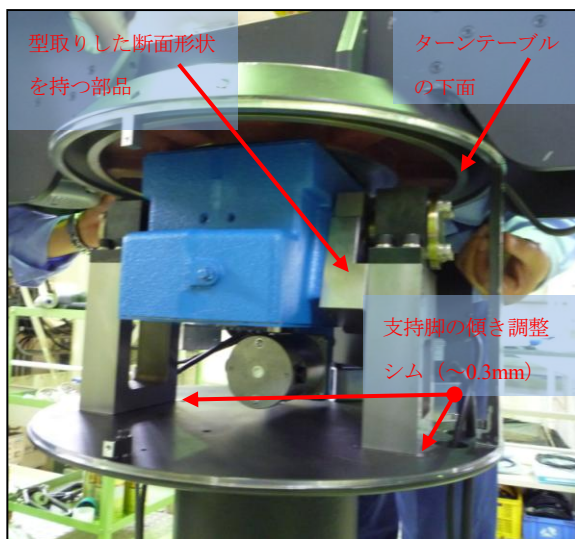


図 8-2 支持脚の取付調整

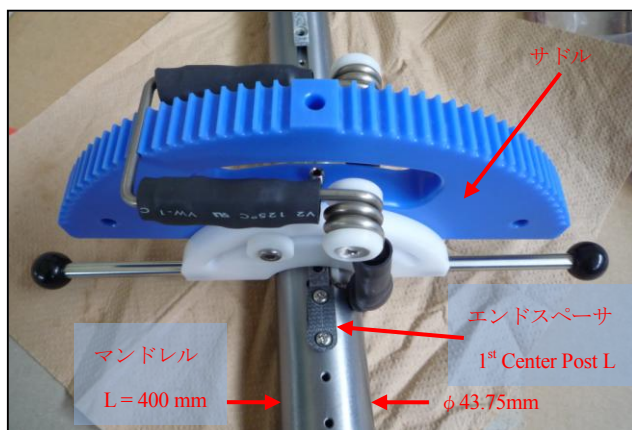


図 8-3 コイル線材抑え治具の組立

新旧巻き線機の形状比較（マンドレル）を図 8-5 に示す。



図 8-4 巻き線機操作盤の組込(図 8-5 操作盤)

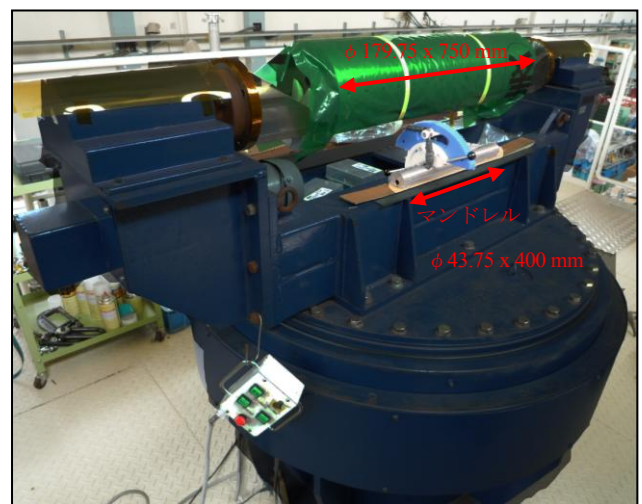


図 8-6 新旧巻き線機（マンドレル）の形状比較
(φ179.75x750mm : 2005 年 Super KEKB の R&D)

4. まとめ

巻き線機の最外径（ターンテーブル部）をφ530mmとして、コイル線材抑え治工具等へのアクセス性の良い小型の巻き線機を製作した。3D モデリングの完成図を図 9-1 に示す。マンドレルのチルト（正・逆反転）機構およびターンテーブルの正・逆回転の回転動作確認を行った組立中の巻き線機を図 9-2 に示す。

トーションバネ機構を用いたコイル線材抑え部品の小型化（抑え駒の断面寸法：2.0 x 2.75 mm、図 4-4 参照）を行った。形状的に小型化の限界に近いので、更なる小型化が必要な場合には別機構の検討も必要と思われる。

今後の巻き線作業については、別の機会に報告する予定である。

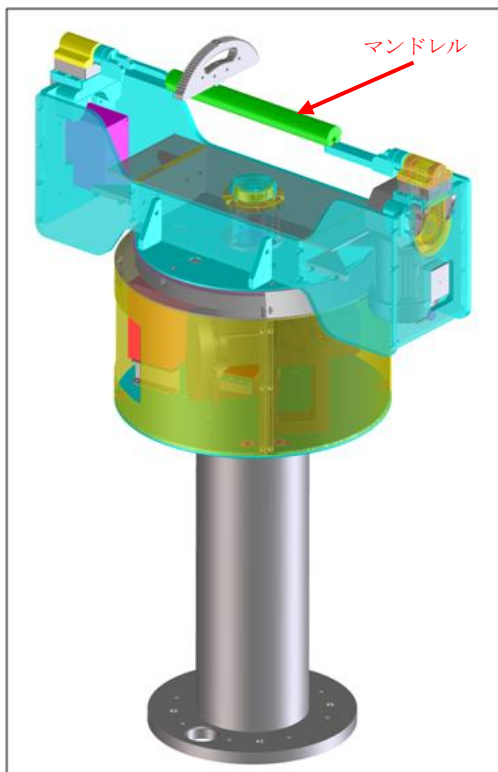


図 9-1 巻き線機の全体図

5. 謝辞

これまでに、加速器研究施設および超伝導低温工学センター・機械工学センターでの超伝導電磁石の開発に於いて、巻き線治工具等の設計製作技術の蓄積等に携わって来られた方々に感謝致します。

6. 参考文献

- 1) 2010 年度春季低温工学・超伝導学会 2010 年 5 月 12 日（水）ポスターセッション 1D-p04
「KEKB アップグレード用超伝導電磁石」大内徳人、土屋清澄、多和田正文、東憲男、宗占国、岩崎昌子
- 2) 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 February 2002 A 寺島 昭男、東憲男
- 3) 低温工学会 1994 年 4 月 「KEKB 用アクティブシールドの R&D」安島 泰雄、大内 徳人
- 4) SSC 「1m モデルマグネットの R&D」 1990 年頃



図 9-2 巻き線作業（ダミー線材）

- 5) 第 3 回 日本加速器学会賞（技術貢献賞）2007 年 8 月 2 日（木）「A SUPERCONDUCTING COMBINED FUNCTION MAGNET WITH SINGLE LAYER COIL WINDING」（単層超伝導コイルによる複合磁場磁石の開発）荻津 透、中本 建志、東 憲男
- 6) TRISTAN 5 テスラ・ダイポール 1982 年頃
- 7) 第 17 回 分子科学研究所技術研究会 第 1 分科会 機械・ガラス工作技術 1-05 2005 年 3 月 2 日（木）
「Super KEBB 用 超伝導四極電磁石 R&D 機の製作」東 憲男、大内 徳人
- 8) ANSYS Workbench Mechanical 入門セミナー 3.3 接触 2010 年 5 月 21 日 初版発行 サイバネットシステム（株）

7. 補足資料

(1) FEM 解析値と材料力学の理論値（変形量）の比較

図 6-1 に示す車軸に貫通穴（ $\phi 15\text{mm}$ ）の貫通穴追加した場合のモデル化した単純梁の丸棒（ $\phi 30\text{mm}$ ）とした場合の理論値と FEM 解析値との比較を表 2 に示す。

また、図 6-4 に示すカップリング部品にスリット（巾 0.23mm ）の追加した場合の FEM 解析値と試作品での実験値との比較を表 3 に示す。

FEM 解析ソフト：ANSYS Workbench 12.0

材料力学の公式：単純梁（片持ち等分布・集中荷重）

参考 HP：<http://rakutin.himegimi.jp/tawami-ryous-02top.html>

変形量（mm）

等分布(N)	理論値	解析値	差	備考
丸棒	0.0013	0.0017	0.0004	良
貫通穴	0.0014	0.0021	0.0007	良
集中(N)				
丸棒	0.0034	0.0026	-0.0008	良
貫通穴	0.0036	0.0030	-0.0006	良

表 2 車軸の FEM 解析結果（材質：構造用鋼）
理論値と解析値との比較（外力：500N）

変形量（mm）

モデル形状	解析値	実験値	差	備考
スリット無	$1.2\text{e-}5$	---	---	---
スリット有	0.231	約 0.2	(0.031)	再測

表 3 スリット部の FEM 解析結果（材質：アルミ合金）
解析値と実験値（3.5N）との比較（外力：3N）

※ 再測：約 0.2mm は、3.5N の時の目視した量である。
外力を 3N にしてダイヤルゲージ等で再測定予定。

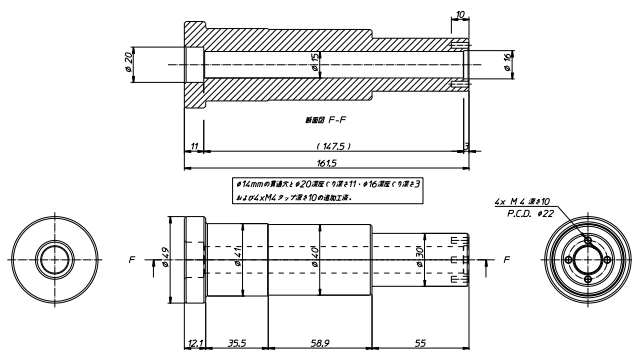


図 10-1 車軸の貫通追加加工図面

(2) 各巻き線機の形状（電磁石の長さ）の比較

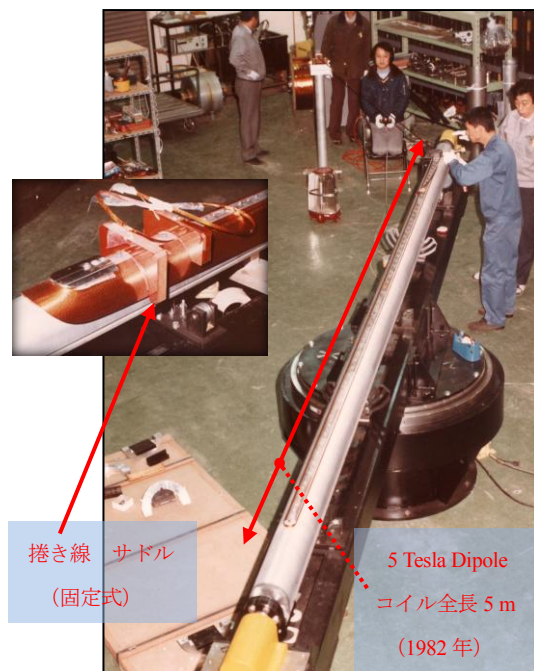


図 10-2 TRISTAN 用 巻き線作業（コイル全長 5 m）

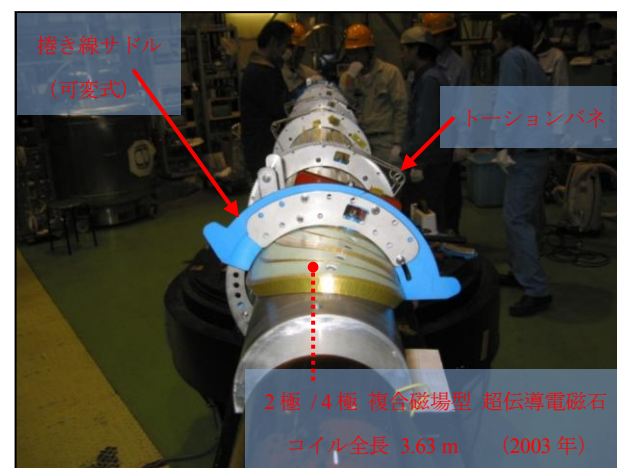


図 10-3 J-PARC 用 巻き線作業（コイル全長 3.63 m）

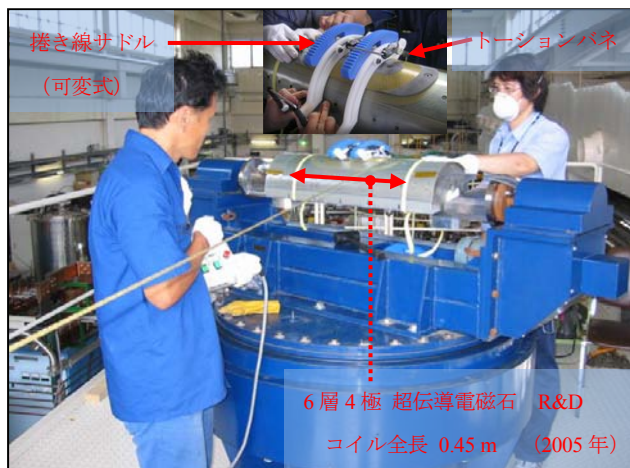


図 10-4 Super KEKB 用 巻き線作業（コイル全長 0.45 m）

KEKmail での迷惑メール対策

押久保 智子(共通基盤研究施設計算科学センター)

1. はじめに

現在の電子メール環境は、送信者側にとってはコストが低く、受信者側のコストが高いという方式であるため、迷惑メールは増大する一方である。ISP(Internet Service Provider)が扱うメールの 70%以上が迷惑メールであるといわれている。研究や業務に支障をきたさないためにも、メールシステムを構築するにあたっては、外部からの迷惑メールに対する防御と、外部に対しては迷惑メールサイトとにならないよう考慮することが不可欠である。

今回は、迷惑メールの定義と一般的な迷惑メールの対策技術、2009 年 12 月共通情報計算機システムの一部として導入したメールシステム KEKmail (研究系メールシステム PostKEK と管理局系メールシステム MailKEK を総称してこのように記す)で導入している迷惑メール対策について述べる。

2. 迷惑メールの定義と現状

迷惑メールと一口に言っても、その内容は多種多様であり、ある者にとっては迷惑メールと判断されるものであっても、他者にとってはそうでない場合もあるが、一般的には、次のようなメールを迷惑メールと呼ぶ。

- a) 受信者の同意、承認を得ずに送信されるメール。
- b) ウイルスなどの感染を目的としたメール。

「セキュリティを保つため、添付ファイルを参照してアップデートをしてください。」等の巧妙な手口で、受信者にウイルスを仕込んだ添付メールを開かせるメールがある。この種のメールは、KEKmail でも頻繁に受信している。

- c) 詐欺目的のメール。

➤ フィッシングメール

実在する会社や組織を名乗り、個人情報などを不正に入手するメールである。KEKmail でも「アカウントの有効期限が近づいています。UID とパスワードをお知らせください。」とのスパムメールを多々受信し、それに対しユーザが返信した事象が発生したが、管理者のログ監視により問題を未然に防いだ経緯がある。

➤ ワンクリック詐欺と架空請求

メールに記載されている URL 等をクリックしただけで、料金を請求するメール。一度クリックしただけで詐欺にあうため、こう呼ばれている。KEK でも度重なる架空請求から逃れるため、メールアドレスを変更せざるをえなかったケースが発生。

- d) 有害情報を含むメール。
- e) プログラムによって作成された架空アドレスを大量に含むメール。
- f) 一時に大量に送信されるメール。

CERT(Computer Emergency Response Team)のように世界中に大量にメールを送信するサイトは、時として迷惑メールサイトと判断される場合があるので、ホワイトリストに登録し、必ず受信できるようにしておく必要がある。

- g) 受信者の業務に支障を及ぼす程送信されるメール。
大量または大容量メールにより quota over を起こさせ、メール受信をできなくすることを目的とする。
- h) 送信者情報や経路情報が偽装されているメール。

KEKmail で実際に被害にあった「差出人: KEK Active! mail <00002010@att.net>」のような安直な偽装から、ヘッダー情報を偽装する巧妙なものまで存在する。

- i) アドレスの存在確認などを目的とした空メール。
- j) エラーメールを悪用した送信メール。

詐称したアドレス先にエラーメールを大量に返信させ、メール宛先サイトを connection lost 状態にしたり、スパムサイトと認識させたりする。詳細は、5.2. (3)に記す。

3. 迷惑メールに対する一般的な対策技術

メール環境の変遷と共に迷惑メールに対しては、様々な対策が採られてきている。2000 年代前半の頃は、パターンマッチング方式によるブロッキングで済んでいたが、送信手法の巧妙化に対応して、迷惑メールの対策技術も高度化してきている。迷惑メールに対する対策としては、メールを送信する側としての対策とメールを受信する側としての対策との両方の対策が必要である。

3.1. ブロッキングによる対策

a) Open Relay の禁止

メール送信側の対策としては、最低限 Open Relay を禁止することである。SMTP サーバ利用者を限定することにより、悪意のある第三者からメールサーバを守ることができる。メールサーバを構築したら、第三者中継の可能性をチェックしてくれる以下のサイトがあるので、運用前に是非チェックをしてから運用に供して頂きたい。

<http://www.rbl.jp/svcheck.php>

<http://www.abuse.net/relay.html>

b) SMTP auth または送受信時のアドレスチェック

c) DNS を用いた発信者アドレスの確認

d) ブラックリストサービスの利用

e) グレーリスト法(一見さんお断り、お馴染みさん方式とも呼ばれる)

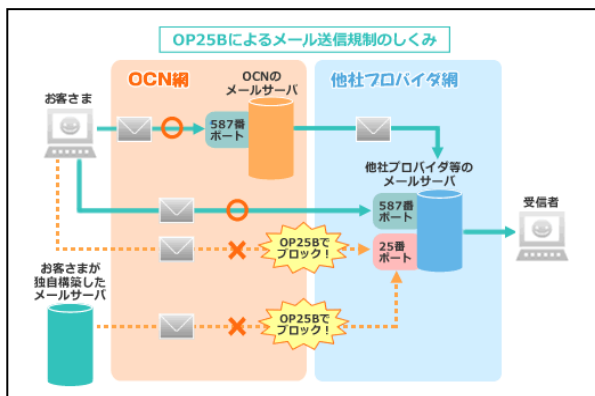
初めての送信者からのメールは一時的に配送を拒否する。正当な MTA であればこの応答を適切に扱い、少し後に再試行することを利用した方法。但し、この方法は初めてメールを受信した場合、メール遅延が発生する問題がある。

f) Sender ID

メールを送信することができる正規のサーバの IP アドレスをリストアップして管理し、メールの送信元アドレスの偽装を防止する。

g) Outbound Port 25 Blocking(OP25B)

ISP(Internet Service Provider)などが会員のパソコンからスパムメールが送信されるのをブロックするために行っている方式である。動的 IP アドレスからメールを送信する際、当該 ISP のメールサーバを経由せず、自サーバから直接メールを送信した時、TCP ポート 25 番(smtp)への通信を規制するという手法である。



出典：OCN 迷惑メール対策 OP25B

OP25B を実施した場合、動的 IP アドレスを割り当てられている送信者が、インターネット接続を提供している ISP 以外の ISP メールサーバからメールを送信できなくなるという問題が発生する。この問題を解決するために、ISP では 25 番ポートとは別に、SMTP AUTH(送信者認証)を実装した 587 番ポート (Submission)を提供している。

3.2. フィルタリングによる対策

a) ルールベースフィルタリング

迷惑メールの特徴をルール化し、コンテンツマッチング方式をとる。

b) Bayesian Filter

キーワードの出現率を解析・学習し、分類するためのフィルタ。学習量が増えるとフィルタの分類精度が上昇する。しかし、日本語の場合は単語による分かち書きがされていないため、そのままフィルタで解析しても適切な解析結果が得られない。日本語の文章は適切な形に分解してからベイジアンフィルタに解析させる必要がある。

c) 協調型フィルタ

自動的に行動履歴を収集、データベース化し、似たような行動をとった場合、データベース情報をもとに推測してフィルタリングする。

4. 法による対策

迷惑メール規制に対する法は幾つかあるが、主なものは次の二つである。携帯電話メールの普及により、迷惑メールの問題が顕著化してきた 2002 年、電子メール送信の適正化等に関する法律として特定電子メール法(所轄官庁:総務省)が制定されると共に、商取引に関する法律、特定商取引法(監督官庁:経済産業省)が改定され、迷惑メールについて法的対応がとられるようになった。

4.1. 特定電子メール法

短時間内に無差別、大量に送信される広告・宣伝メールで送受信上の支障防止を目的とし、メールの送信を規制するために 2002 年に制定された法律である。2002 年オプトアウト方式による規制が導入、2005 年送信者情報を偽装した送信の禁止、2008 年オプトイン方式による規制の導入、2009 年には消費者庁が広告宣伝メールなどの送信に関して必要な措置ができるようになる。罰則の強化、国際連携の推進など、世情の変化に応じ

て改正されている。

この法は簡単に記すと、次のような内容である。

- オプトイン方式による規制(送信者および送信委託者対象の規制)
 - 同意のない者への原則送信禁止
 - 受信拒否者への再送信禁止
 - 「未承認広告」などの表示義務
 - 同意記録の保存義務
- 送信者情報を偽った送信の禁止
- 架空アドレスを宛先とする送信の禁止
- 電子通信事業者に関する規定
- 違反時の措置（罰則、情報提供など）

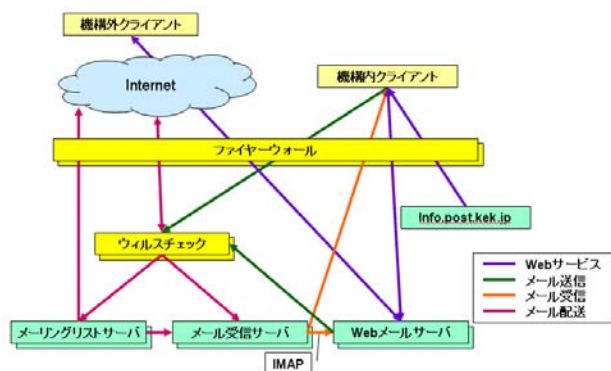
4.2. 特定商取引法

消費者保護・取引の公正の観点から、電子メール広告も 2002 年の改定により特定商取引法の規制の対象となった。規制の対象者は、広告メールを送信する事業者および業務を受託している者である。請求または承諾を得ずに広告メールを送信する場合、「未承諾広告」と表示するなどの義務が課されるとともに、前述のオプトイン方式による規制も導入された。

5. KEKmail での迷惑メール対策

KEKmail の構成を概略的に示すと、図 1 のような構成である。主に迷惑メール対策は、図 1 のウイルスチェックと表記した MX サーバで実施している。機器としては Cisco 社の IronPort というメールセキュリティアプライアンス製品を利用している。

図 1 KEKmail 構成概略図



5.1. ウイルスメール対策

ウイルスメール対策としては、メール送受信時にウイルスのチェックを行っている。

IronPort には、ウイルスチェックソフトとして Sophos

Anti-Virus と McAfee AntiVirus がバンドルされている。

双方を利用した経験から、Shphos の Anti-Virus を利用することとした。選択基準は、

- パターンファイルの提供が速い。
製品アップデートを 5 分間隔で実施提供。
- ホスト侵入防止システム機能がある。
コードが実行される前にその振る舞いを解析し、未知の脅威を検知。

である。

ウイルスを検知したとき、ウイルスチェックができなかったときの通知メールの配信は、送信メールと受信メールとで異なった対処をしている。送信メールの場合は、KEKmail のユーザである送信者にチェック内容を知らせる通知メールを配信する。しかし、受信メールの場合は、送信者が詐称あるいは架空アドレスである場合が大半であるため、送信者に通知メールを配信すると KEKmail が迷惑メールサイトとみなされかねないため、配信はせず、メールの受信者に送信者 (From) と検知ウイルス名情報を記載した通知メールを配信している。

また、試用として IronPort Virus Outbreak Filter を利用している。新種のウイルス発生時、怪しいメールを設定した期間一時隔離し、アンチウイルスベンダからの定義ファイル提供までの間にウイルスが拡散するのを防止する機能である。新種ウイルス発生との判断は、インターネット上を流通するメールを常時監視する SenderBase (5.2. (1) 参照) を利用して、類似したファイルが添付された電子メールの急増などの情報をもとに認識される。KEKmail にても、この機能の有意性は実証されている。参考までに、図 2 に 2010 年度のウイルス検知数を示す。

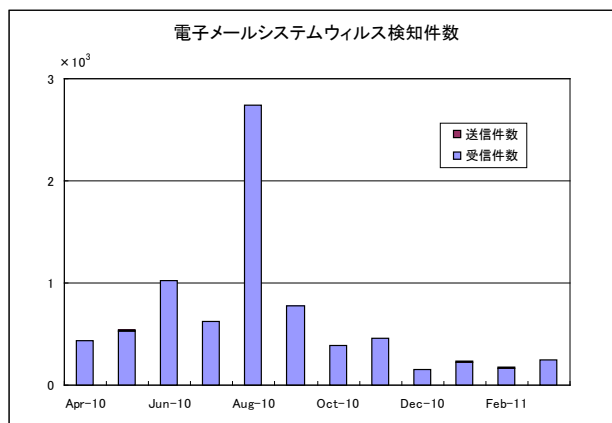


図 2 2010 年度ウイルス検知数

5.2. メール受信時のスパムメール対策

メールを受信する場合は、MXサーバである IronPort にて、以下の複数の対策を実施している。

(1) 送信元 IP 評価方式によるスパムチェック

IronPort SenderBase/Reputation Filters と呼ばれる送信元 IP 評価方式 にて、スパムサイトからのメールか否かを判定し、スパムサイトとからのメールと判定されたものは受信を拒否する。SenderBase は、IP アドレスの監視、インターネットを流通するメールの 25%以上をサンプリングするなどの情報を基に、送信元 IP アドレスを 150 以上のパラメータで評価し、-10 ~+10 のスコアを付けたものである。メーカー情報では、-4 での誤検知は 1/100 万通とあるが、誤検知が多くてはチェックする意味が半減してしまう。KEKmail では試行錯誤の結果、スパム判定閾値-3.7 で運用を行っている。運用後 5 年以上経過しているが、設定閾値の見直しに至る誤検知のクレームは受けていない。メールサーバを立ち上げ運用を行っている方は、以下のサイトにてサーバの状態を判定できるので試してみることを薦める。

<http://www.senderbase.org/>

(2) メールポリシーによるチェック

WHITELIST、BLACKLIST、RELAYLIST などメールポリシーに沿った、メール受信の可否判定を行っている。

(3) 送信アドレス詐称による後方散乱対策

後方錯乱(Backscatter)メールとは、メールボックスの容量オーバー、送信先アドレスが存在しなかったなどのメール配信エラーが発生した時、メールサーバからメール送信者宛てにエラーメールを返すという SMTP の仕様を逆手にとったスパムメールである。SMTP が配信するこのエラーメールをバウンスメールと呼ぶ。問題なのは、スパムメールの場合エンベロープの送信者情報に記載されているアドレスが詐称されているということである。バウンスメールは本来の送信者ではなく、詐称に使われたアドレスに返信する。もし、返信アドレスが存在しないアドレスだった場合、相手先メールサーバと接続ができないため、バウンスメールを配送することができずキューに溜まり溢れるという事象が生じる。また、KEKmail のような MX サーバと mbox サーバが二段構成になっている場合は、一旦 KEKmail 内にメールを取り込んでからバウンスメールを返すため、バウンスメールの From ドメインが KEKmail となる。SMTP 仕様に則り詐称に使われたアドレス宛にエラーメールを大量に送信すると、受信者側からは

KEKmail がスパム送信者とみなされてしまう。実際、PostKEK でも過去にこの問題により、ある ISP から「connection lost」状態にされた経験がある。状況によっては、RBL 等に登録される恐れもある。

後方錯乱メール問題を回避するには、KEKmail に存在しないアドレス宛のメールは、MXサーバへの SMTP connection 時にエラー応答を返し、メール受信を拒否することである。それを実現するため、MXサーバである IronPort の LDAP 機能を用いて、SMTP connection 時に宛先アドレスが KEKmail に存在するアドレスか否かのチェックを行っている。

(4) コンテンツによるフィルタリング

コンテンツによるフィルタリングは、Cisco 社の IronPort Anti-Spam を利用している。スパムと判定した場合は、ヘッダーに「KEKmail-anti-spam-server: spam detected」、Subject に「*Spam?」を付加し、そのメールを受信するか破棄するかは各ユーザの判断に委譲している。

また、KEKmail では、ユーザからの申し出があった内容で管理者がサーバでのフィルタが妥当と判断したものに関しては、適宜ルールを設定し、フィルタしている。

5.3. メール送信時のスパムメール対策

KEKmail からメールを送信する場合は、発信アドレスが KEKmail で発行されたメールアドレスであるかチェックをし、詐称を禁止している。また、smtp.post.kek.jp では、From アドレスが空のメールを送信することもできない設定にしている。図 3 に 2010 年度のメール処理件数とスパム判定されたメール数のグラフを示す。スパムメール数は、処理メール数の約 75%以上を占める。

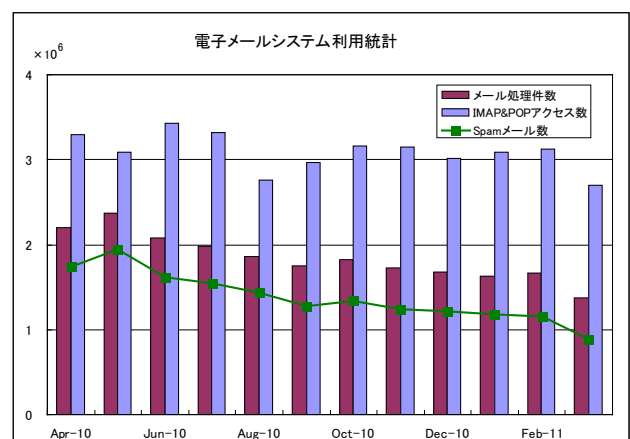


図3 KEKmail メール処理件数とスパムメール数

6. 迷惑メールに対するユーザとしての対策

ユーザとしては、次のような事柄に注意するだけでも、少なからず迷惑メールから自己防衛することができるので、是

非実行して頂きたい。

- 不審なメールは開封しない。

開封ただけでウイルスに感染するメールが存在する。

また、ウイルス感染により、アドレス帳情報や PC 内の情報が漏洩することがある。

- 疑わしいメールには返信しない。

悪意のある送信者に、アドレスの存在を確認させてしまう。

- メールアドレスを不用意に公開しない。

Web 公開時には自動採取されないよう、表示に配慮する。

- 不審なメール、登録した記憶がないメールの配信停止申し込みリンクは、クリックしない。

クリックただけで、アドレスを採られることがある。

- 統一メールアドレスとユーザ名アドレスを使い分ける。

業務上一般的に周知させるメールアドレスとしては、統一メールアドレスを利用する。統一メールアドレスが迷惑メールのターゲットにされた場合、アドレスの停止、変更は容易である。ユーザ名アドレスは、信頼の於ける相手に用いるのが良い。ユーザ名アドレスは、受信箱のフォルダ名であるため、アドレス変更は mbox のデータ移行も伴う。

- オンラインでの登録や e-コマースサイトでは、フリーメールアドレス等を利用する。

登録先サイトが万が一情報漏えいした場合、業務に支障を生じさせないように備える。

- メール転送先設定アドレスが適切か。

ピンポンあるいはループになっていないか注意する。特に、多くのメールアドレスを利用している場合、エラー通知メールがループするケースが多々あるので、注意を要する。

7. おわりに

迷惑メール対策は、こうすれば完璧という手法はない。スパム対策としては現在の所、送信元 IP 評価方式が最も有効であると判断しているが、最近のスパムメールの送信元がアフリカや南米からのものが増えているように、スパマーは未だフィルタされていないサイトを見つけては、そこを経由して送信してくるのが現状である。KEKmail の迷惑メール対策は、現時点で出来得る限りのことを行っており、一定の評価が得られていると自負している。2012 年 2 月に更新予定の次期メールシステムの仕様策定を行っており、次期システムの迷惑メール対策もほぼ同様の対策とす

る予定である。

参考文献

- 1) 迷惑メール対策推進協議会 迷惑メール対策ハンドブック (2010)
http://www.dekyo.or.jp/soudan/anti_spam/
- 2) 総務省、消費者庁、(財)日本データ通信協会 特定電子メールの送信適正化等に関する法律のポイントー広告宣伝メールに係るオプトイン方式の規制等についてー
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/d_syohi/m_mail.html#ordinance
- 3) Cisco 社 IronPort Email and Web Security C シリーズデータシート
http://www.ironport.com/jp/pdf/ironport_jp_data_sheet_c-series.pdf
- 4) OCN 迷惑メール対策 OP25B(メール送信規制)
<http://www.ocn.ne.jp/mail/info/op25b/>

ILC 計画のためのニオブ製 9 セル超伝導空洞の開発

矢野 寿郎（所属：加速器第 6 研究系）

1. はじめに

2004 年、ILC (International Linear Collider) 計画では超伝導空洞を採用する事が決定された。この決定を受けて KEK では 2005 年より 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の研究開発を開始した。加速電場 25 ± 5 MV/m を開発当初の目標として進め、2007 年 2 月には MHI_02 空洞で目標を上回る 29 MV/m を達成した。2010 年 11 月から 12 月にかけて行われた MHI_12 空洞と MHI_13 空洞の測定において、ILC での目標仕様 ($Q_0 > 1.0 \times 10^{10} @ 31.5$ MV/m, $Q_0 > 0.8 \times 10^{10} @ 35$ MV/m) を満たし、かつ最大加速電場 40.7 MV/m (MHI_12)、36 MV/m (MHI_13) を実現した。

2. KEK - L バンドグループでの開発史

2004 年の ILC 計画の決定を受けて 2005 年より 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の研究開発を開始した。しかし我々は、ドイツ DESY を中心に進められていた TESLA (Tev Energy Superconducting Linear Accelerator) 計画用 1.3 GHz 単セル超伝導空洞の研究開発を 1991 年には既に開始していた[1]。単セル空洞の性能試験は比較的容易なため、表面処理工程でのパラメータ変更が空洞性能にどう反映されるか、データを蓄積するには都合が良い。数多く行われた空洞単体性能試験（縦測定）から高加速電場達成のために必要な工程として 1) 空洞表面処理としては電解研磨 2) 750 °C でのアニール 3) 超純水高圧洗浄 4) クラス 10 クリーンルームでの空洞組み立て 5) 電解研磨と 100 °C ベーキングを併用する、この 5 つが必要である事を明らかにした[2]。また、電解研磨を行う場合、ニオブ材の残留抵抗比 RRR ($\propto$ 熱伝導率) と得られる最大加速電場の間に明確な関係は見られない事、TESLA 形状空洞では最大加速電場が 40 MV/m 程度に制限される事が明らかにされた。

達成された最大加速電場をまとめると次の通りである。1993 年には三菱重工製単セル空洞で 30 MV/m、9 セル空洞で 12 MV/m、1996 年には KEK 工作センターで製作された単セル空洞で 40 MV/m を達成した。1996 年以降、共同研究として参加した東芝、三菱電機、野村鍍金、住友重機、日立、CERCA/ペシネジャポンの各社が製作した空洞においても 24~30 MV/m が達成された。多連空洞の研究開発も同時に行っており、1997

年には東芝製 3 セル空洞で 30 MV/m、1998 年には三菱重工製 3 セル空洞で 25 MV/m、CERCA/ペシネジャポン製 3 セル空洞で 17 MV/m を達成した。

2000 年からは大強度陽子加速器 J-PARC 用 972 MHz、 $\beta=0.725$ 9 セル超伝導空洞の研究開発を開始した。2004 年にはこの空洞 2 台を組み込んだクライオモジュールを 2K に冷却し、大電力パルス試験を行い、最大加速電場 12 MV/m を達成した[3]。この時の経験は、ILC 計画における横型モジュール試験において非常に役立つ事となった。

その他、従来職人の手によるバフ研磨を赤道溶接部に行っていたが、研磨材を空洞内に入れ、空洞を自転と共に公転運動させる事で簡単かつ高速研磨が可能になる遠心バレル研磨装置の適用が挙げられる[4]。この装置により、自転のみのバレル研磨に比べ研磨速度は 10 倍以上、4 時間で 30 μ m の研磨が行える様になった。

3. ILC 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の研究開発

図 1 に 9 セル超伝導空洞と横型クライオスタット内に設置するためにヘリウムジャケットが装着された 9 セル超伝導空洞を示す。



図 1：ILC 用 9 セル超伝導空洞（上）、及びヘリウムジャケットが装着された 9 セル超伝導空洞（下）

3.1 STF-1 計画；MHI_01~MHI_04 空洞

2005 年の開発開始時に掲げた目標は、それまでの経験と実績を考慮して次の通りである。

(1) 加速電場 25 ± 5 MV/m を目標とする

9 セル空洞の場合、1 セルでも最大加速電場が低ければ、例え残りの 8 セルが 40 MV/m を出せるポテンシャルを持っていたとしても性能の低い 1 セルで全体の最大加速電場が制限されてしまう。そのため 9 つ全てのセルを高い品質レベルで製造しなければならない。単セル空洞では高頻度で 30 MV/m ~ 40 MV/m の高電場を達成出来ていたが、9 セル空洞の製作個数、表面処理及び性能測定の実績は単セル空洞のそれに比べて非常に少なかった。そのため、25 MV/m を現実的な目標と定めた。

(2) 空洞の標準的な表面処理方法を確立する

単セル空洞での標準的な処理工程は次の通りである。遠心バレル研磨($\sim 100 \mu\text{m}$)→Pre-EP ($5 \sim 10 \mu\text{m}$)→EP-I ($100 \mu\text{m}$)→アニール (750°C , 3hrs)→EP-II ($20 \sim 50 \mu\text{m}$)→温水超音波洗浄 (50°C , 1hr)→高圧水洗 (8 MPa , 8hrs)→組み立て→ベーキング→空洞単体性能試験 (縦測定)。当初はこの工程で開始し、新たな処理工程も順次試験する事にした。空洞性能に反映されるか否かでその処理工程の必要、不要を判断する。9 セル空洞の場合、アニール後に周波数調整と 9 セル全ての電場強度を等しくするためのプリチューニング工程が加わる[5]。仕上げ研磨 EP-II から縦測定、縦測定後の電場平坦度の確認までの 1 サイクルは通常 2 週間である。

(3) ビーム加速可能なモジュールを作り上げる

高性能な空洞を作り上げる事は勿論であるが、超流動液体ヘリウム温度で全ての機器類がきちんと動作し、ビーム加速が可能なモジュールを作り上げる事が最重要開発目標である。

2005 年度から 2006 年度に製造された MHI_01 ~ MHI_04 空洞は 2006 年 2 月より 2007 年 2 月までの 1 年間に総計 14 回の縦測定が行われた。図 2 に、MHI_01~MHI_04 空洞 4 台の縦測定結果を示す。目標であった 25 MV/m は MHI_02 空洞の 5 回目の測定で初めて達成された。

その後 MHI_01~MHI_04 空洞は横型クライオスタットに組み込まれ、2K での大電力パルス試験が STF-1 計画として行われた[6]。

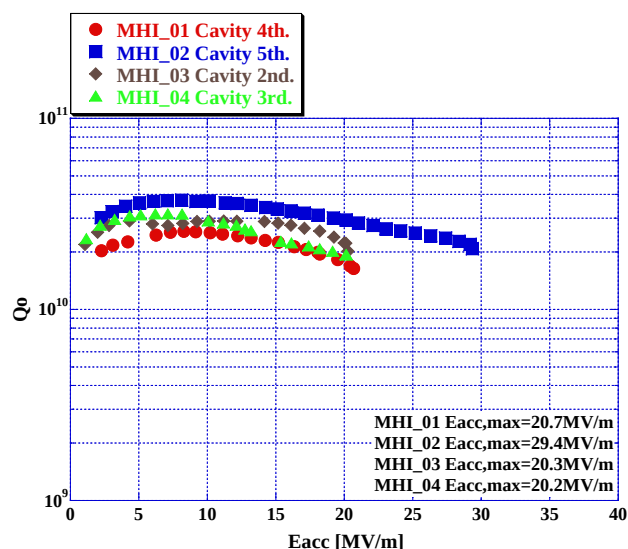


図 2：MHI_01~MHI_04 空洞の縦測定の結果

3.2 S1-Global 計画；MHI_05~MHI_09 空洞

S1-Global 計画用 MHI_05~MHI_09 空洞が製造された。これらの空洞には STF-1 からの改善点として、1)空洞製造時の品質管理強化と作業環境の清浄化 2)単極高調波モード TM011 との結合を改善するために HOM カプラーの取り付け角度変更とビームパイプ径の縮小が施されている。

S1-Global 計画は、KEK から 4 台の空洞を STF-1 計画で使用したクライオスタットに (Module-A)、アメリカ FNAL から 2 台、ドイツ DESY から 2 台の空洞をイタリア INFN の設計、製造したクライオスタット (Module-C) に組み込み、計 8 台の空洞で 2K での高加速電場の実証試験を行う計画である。

MHI_05~MHI_09 空洞では、STF-1 計画からのフィードバックとして、遠心バレル研磨を処理工程から削除した。高速研磨が可能になったとはいえ、 $100 \mu\text{m}$ の研磨に 5 日程かかる事、また遠心バレル研磨は主に赤道部溶接欠陥の除去のために行われていたが、電子ビーム溶接の最適化を行った事で滑らかな溶接面が得られるようになったからである。

新たな表面処理工程として、過酸化水素水リンス、エタノールリンス、弗酸リンスを試してみたが、縦測定結果に明確な差は現れなかったため現在行っていない。

2008 年には STF 棟に次々と設備が整ってきた[7]。空洞の性能を左右する表面処理工程は、それまで外注に出し、処理を終了してから KEK に運搬し組み立て開始まで 3 時間程かかっていたが、電解研磨装置が STF 棟内に設置された事で、処理が終わると隣接するクリ

ーンルーム内でただちに組み立て工程に移れる様になった。図3に表面処理設備を示す。

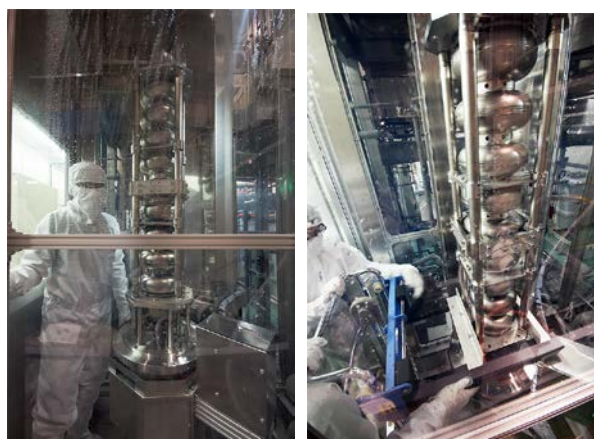
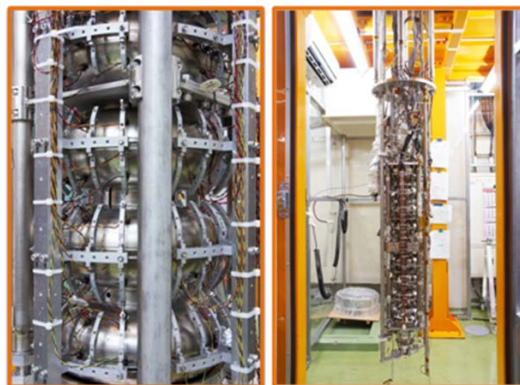


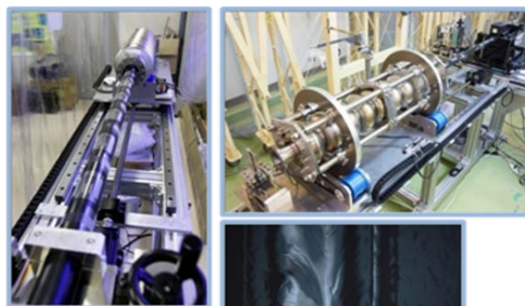
図3：STF棟内に設置された電解研磨装置（上）、及びクリーンルーム（下）

工程における改善点として、精密部品洗浄剤（FM20）を使用して電解研磨後の空洞内面の超音波洗浄や真空部品の洗浄を行う様にした。クリーンルーム内での作業工程を逐一パーティクルカウンターで監視して、ゴミが多く出る工程を調べあげた。その結果、まず作業前にクリーンルームの床と作業台の清掃を必ず行う事にした。組み立て前に真空部品や使用する工具をイオンガンで洗浄する事にした。ウェアも短期間で洗濯済みの物に交換、使用するゴム手袋もゴミの少ないタイプに切り替えた。これらの地道な改善により電界放出電子（フィールドエミッション）による空洞性能の低下という事象は減少した。

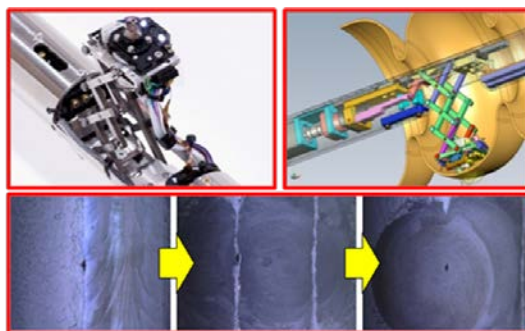
温度マッピング装置により空洞性能を制限する発熱箇所の特定が可能になり[8]、空洞内面検査装置により発熱箇所にある表面欠陥の観測が可能になった[9]。表面欠陥のレプリカを作成して、その形状解析により、欠陥のサイズや形状の分析が可能になった。またその欠陥を修整する局所研磨装置も開発された[10]。図4にこれらの装置を示す。



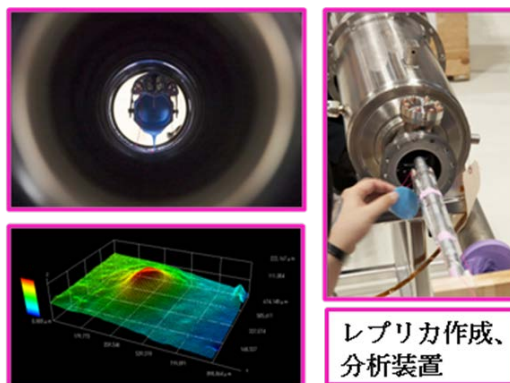
温度マッピング装置



内面検査装置



局所研磨装置



レプリカ作成、分析装置

図4：上より温度マッピング装置、内面検査装置、局所研磨装置、レプリカ作製治具と分析結果

処理工程における改善及びこれらの装置を十分に活用した事で MHI_05~MHI_09 空洞の性能は MHI_01~MHI_04 空洞に比べ飛躍的に向上した。図5に MHI_05~MHI_09 空洞 5 台の縦測定結果を示す。

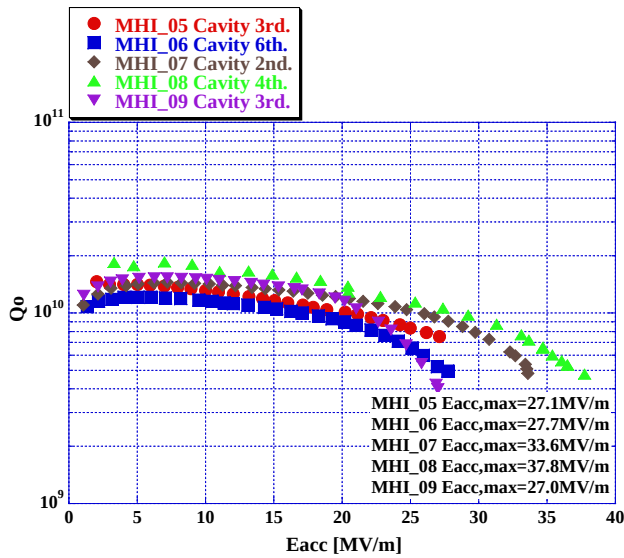


図 5 : MHI_05~ MHI_09 空洞の縦測定の結果

得られた表面欠陥のデータと縦測定の結果を組み合わせる事により、幾何学的欠陥の形状と最大加速電場の関係が分かってきた。これまでに縦測定が行われた MHI_01~MHI_09、AES_01、AES_03 の 9 セル空洞、ERL_01、ERL_02 の 2 セル空洞、計 13 空洞、103 セルの内面検査から見つかった欠陥の幾何学的形状と得られた最大加速電場の関係を図 6 に示す。欠陥が勾配 11 度線以下に位置するなら空洞性能にはあまり影響がない事が分かった[11]。また勾配 11 度線以上に位置する欠陥については局所研磨を行う事になる。

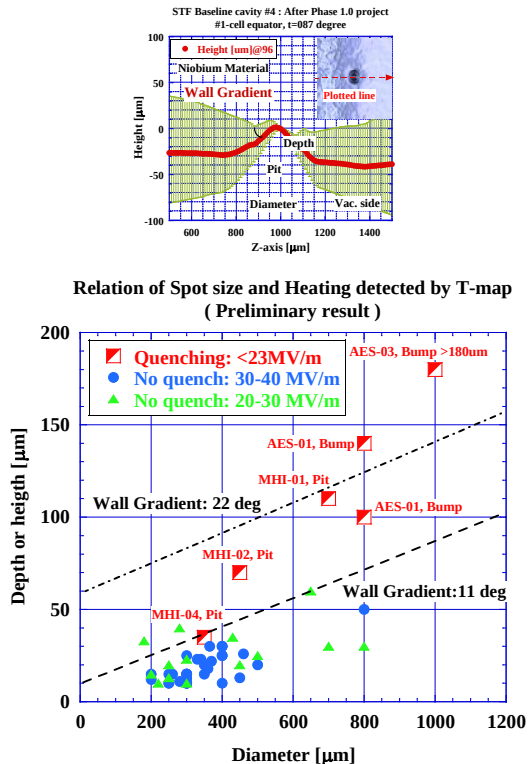


図 6 : 幾何学的欠陥の形状 と最大加速電場の関係

3.3 S0 計画 ; MHI_10、MHI_11 空洞から量子ビーム計画 ; MHI_12、MHI_13 空洞へ

S0 計画用 MHI_10、MHI_11 空洞が製造された。これは赤道溶接部をこれまでの突き合わせ構造から印ろう構造に変更して製造された初めての空洞である。印ろう構造になったため S1-Global 用空洞と赤道部電子ビーム溶接条件が変わってしまった。各々 3 回の縦測定を行い、最終結果は MHI_10 空洞 ; 最大加速電場 $E_{acc,max}=19.5$ MV/m、無負荷 Q 値 $Q_0=1.1 \times 10^{10}$ 、MHI_11 空洞 ; $E_{acc,max}=18.1$ MV/m、 $Q_0=1.7 \times 10^9$ であった。

続いて量子ビーム計画として実際にビーム加速に使用される MHI_12、MHI_13 空洞が製造された。赤道溶接部は印ろう構造である。事前に行われた内面検査で赤道部の欠陥が MHI_12 空洞で 1 か所、MHI_13 空洞で 3 か所みつかったが、図 6 から問題のないレベルと判断された。また、アイリス部及びビームパイプ部には欠陥は見つからなかった。この結果から高性能が期待されたため、細心の注意を払って表面処理、組み立てが行われた。図 7 に MHI_12 空洞 1 回目縦測定の結果を示す。得られた結果は予想通りであったが、ILC 目標値 $Q_0=0.8 \times 10^{10}$ @ $E_{acc}=35$ MV/m を満たせなかったため、再処理(EP-II 10 μm ; 通常 20 μm)して 2 回目の縦測定を行う事になった。MHI_13 空洞は、1 回目の縦測定から ILC 目標値を満たす事が出来た。MHI_12 空洞 2 回目の縦測定では ILC の目標値を満たすと共に、単セル空洞で達成して以来、15 年目にして初めて 9 セル空洞で最大加速電場 40 MV/m を達成する事が出来た。図 8 に ILC の目標値を満たした縦測定結果を示す。

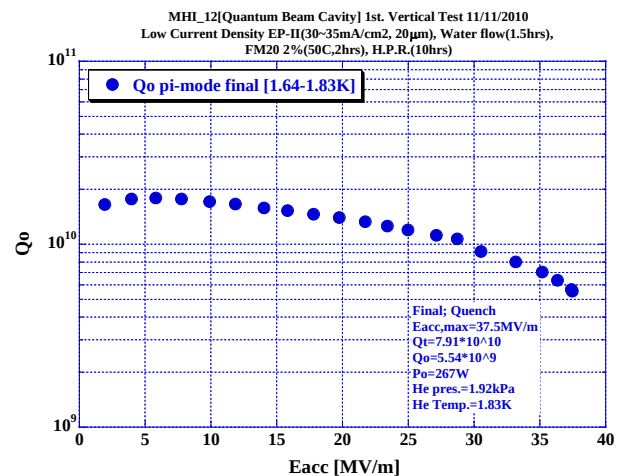


図 7 : MHI_12 空洞 1 回目の縦測定の結果

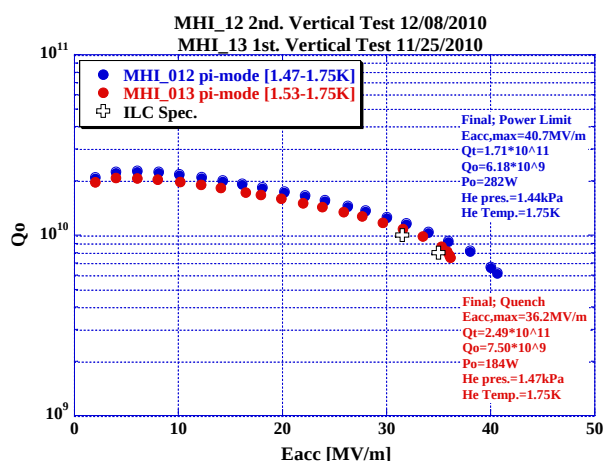


図 8: ILC の目標値を満たした MHI_12、MHI_13 空洞の縦測定の結果

現在行われている標準的な表面処理工程は次の通りである。

Pre-EP (5 μ m)→EP-I (100 μ m)→アニール (750 $^{\circ}$ C, 3hrs)→低電流密度 EP-II (20 μ m)→温水超音波洗浄 (FM20 2%, 50 $^{\circ}$ C, 1hr)→超純水高圧水洗 (8 MPa, 10hrs)→組み立て→ベーキング (100 $^{\circ}$ C, 48hrs)→空洞単体性能試験

4. 空洞高性能化に何が効果的であったのか

MHI_12 空洞、MHI_13 空洞は 2 台共 ILC の目標値を満たす事が出来た。さらに MHI_12 空洞はビーム加速が可能な 9 セル空洞としては日本国内で初めて最大加速電場 40 MV/m を突破した。高性能を実現させた要因は以下の様に考えられる。

(1) 電子ビーム溶接技術の向上

MHI_01~ MHI_04 空洞の測定結果から空洞性能を制限する原因として、主に赤道部電子ビーム溶接部での表面欠陥であると理解した。欠陥を可能な限り減らすために溶接部の事前検査、清浄化処理、パラメータの変動に対して安定領域の広い溶接条件の探し出し、溶接環境の整備、清浄化を行った事で欠陥のない滑らかな溶接が可能になった。

(2) STF 棟の設備整備

STF 棟で空洞表面処理が行える様になり、処理終了後、隣接するクラス 10 クリーンルームでただちに組み立て工程へ入れる様になった。

(3) 測定装置の整備

内面検査装置や温度/X線マッピング装置が整備され、空洞性能と幾何学的欠陥の形状との関係が理解された。局所研磨装置により空洞性能を制限する欠陥を事前に除去する事が可能になった。

(4) 表面処理、部品洗浄、組み立て工程の改善

空洞内面の超音波洗浄や部品洗浄に精密部品洗浄剤 (FM20) を使用する、作業前にクリーンルームの床と作業台の清掃を必ず行う、組み立て時にイオンガンで部品の清浄化を行う、粒子の少ないゴム手袋を使用する、ウェアは短期間で交換するといった変更により、クリーンルーム内環境が改善された。

図 9 に各空洞毎の縦測定で得られた最大加速電場のまとめを示す。MHI_A 空洞は、新しい製造工法の検証と確立のために製作された試験空洞である。

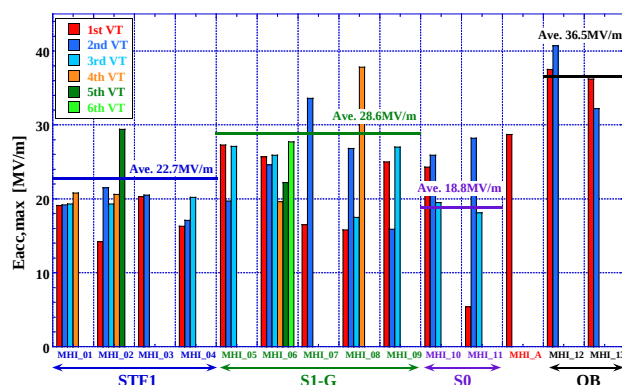


図 9: 縦測定で得られた最大加速電場のまとめ

5. まとめ

量子ビーム計画用 MHI_12、MHI_13 空洞は共に ILC の目標値を満たす性能を達成出来た。特に MHI_12 空洞は、1996 年に TESLA 計画用 1.3GHz 単セル超伝導空洞で 40 MV/m を達成して以来、15 年目にして 40 MV/m に到達した、ビーム加速可能な初めての 9 セル空洞である。高性能化の要因としては電子ビーム溶接技術の向上と溶接環境の改善、STF 棟内での空洞表面処理設備とクリーンルームの整備、組み立て工程における地道な改善があげられる。

参考文献

- [1] 第 1 回超伝導リニアック研究会報告集 KEK Proceedings 98-12、第 2 回超伝導リニアック研究会報告集 KEK Proceedings 99-25、第 3 回超伝導リニアック研究会報告集 KEK Proceedings 2000-23.
- [2] 加古永治 博士論文 “高電界応用のための L バンド超伝導加速空洞システムの開発に関する研究” 2010 年度。
- [3] E.Kako, et al., “Pulsed Operation of 972MHz Prototype Cryomodule for ADS Superconducting Linac”, Physica C 441(2006) p220

- [4] 樋口玉緒 博士論文 “新しい機械研磨と電解研磨による水素吸蔵を起こさない超伝導空洞の表面の処理法の開発” 2002 年度。
- [5] T.Shishido, et al., “Frequency Tuning of an Accelerating Mode in STF Baseline Cavities”, 第 3 回日本加速器学会年会、第 31 回リニアック技術研究会、仙台 (2006) p865.
- [6] E.Kako, et al., “Cryomodule Test of four Tesla-like Cavities in the Superconducting Test Facility at KEK”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, Vol.13, 041002 (2010)
- [7] STF Group, “STF Phase-I Activity Report”, KEK Report 2009-3 (2009).
- [8] Y.Yamamoto, et al., “Summary of Results and Development of Online Monitor for T-mapping /x-ray-mapping in KEK-STF”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan (2010) p3371.
- [9] Y.Iwashita, et al., “Development of High Resolution Camera for Observation of Superconducting Cavities”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).
- [10] K.Watanabe, et al., “Repair Techniques of Superconducting Cavities for Improvement Cavity Performance at KEK-STF”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan (2010) p2965.
- [11] 渡邊 謙 “空洞縦測定-最近の結果” LC 技術検討会 2011 年 1 月 11 日発表資料。
http://lcdev.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/IMAGES/Performance_Cavity_vertical_test.pdf

STF の低電力高周波源整備

片桐 広明（加速器研究施設加速器第五研究系）

1. 概要

高エネルギー加速器研究機構の超伝導 RF 試験施設 (STF) では、国際リニアコライダー計画 (ILC) における技術開発の一環として 2010 年 7 月から 2011 年 2 月まで国際研究協力による S1 グローバルと呼ばれる試験が行われた。この試験はステージ 1 からステージ 3 の 3 段階に大別され、ステージ 1 では 1 台のクライストロンで 8 台の超伝導空洞を、ステージ 2 ではクライストロン 2 台で 4 空洞ずつ励振する構成がとられた。さらにステージ 3 では 1 台のクライストロンで 2 空洞を励振する分布型 RF システム (DRFS) の評価を行った。ILC で求められる加速電界の振幅及び位相安定性を達成するためデジタルフィードバック (FB)・フィードフォワード (FF) 制御が必要とされ、ステージ 2 まではコンパクト PCI を基にした FPGA ボードを、ステージ 3 では新たに開発された μ TCA を用いたシステムを採用した。また RF のモニタとしてはパワーメータによる計測のほか、今後より多くの信号の取り込みが求められることから、FB/FF 用ボードを転用して 1 つの ADC で複数の信号を計測可能とした IF (中間周波数) ミックス方式と、34 チャンネルの ADC を搭載した FPGA ボードとを性能評価のため併用した。これら STF における低電力高周波系 (LLRF) についてステージ 3 での様子を中心に報告する。

1. DRFS での LLRF 系の構成

S1 グローバルのステージ 2 までは地上に設置されたクライストロンから地下の超伝導空洞に電力を供給していたが、ステージ 3 の DRFS 試験では地下に 2 台の DRFS 用クライストロンを設置し、それぞれ 2 つの空洞を励振する方式が採られた (図 1)。これに伴い、LLRF 系では FB/FF 制御部を地下に設置することになった (図 2)。

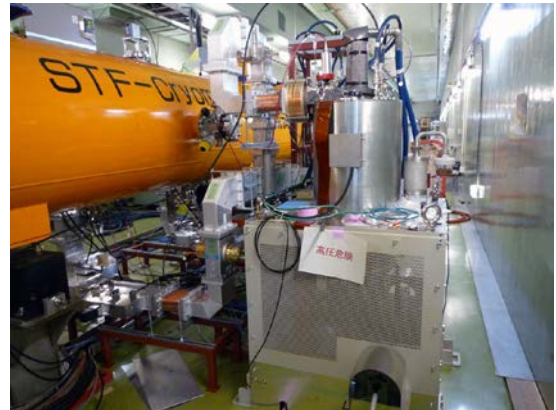


図 1 DRFS 用クライストロン

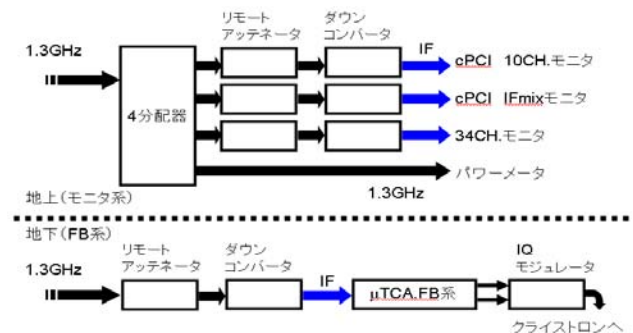


図 2 DRFS 試験時の LLRF 系の構成

2. デジタルフィードバック/フィードフォワード系

ILC で求められる空洞内の加速電界の安定度は、パルスの平坦部で振幅 0.07%、位相で 0.24 度とされている。この安定度を達成するため、約 1.5mS のパルス内で振幅と位相の FB/FF 制御を行うシステムが導入されている。このシステムでは、まず 1.3GHz の高周波信号を 10MHz の中間周波数 (IF) にダウンコンバートし、ADC により 40MHz のクロックでサンプリングする。1 波長を 90 度の位相差ごとに 4 回サンプリングする事で I/Q 成分が求められる。続いて、FB/FF 制御部が振幅・位相変調を施した I/Q 信号を、DAC から I/Q 変調器に供給する (図 3)。

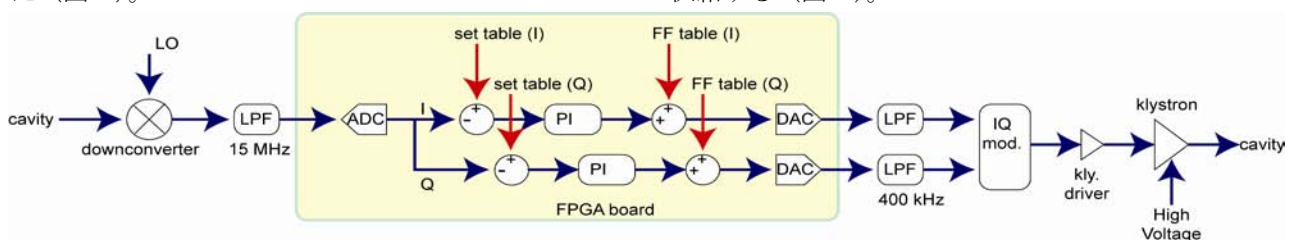


図 3 FB/FF 制御のブロックダイアグラム

図4はステージ2まで使用されたコンパクトPCIをベースとしたFB/FF系である。10チャンネルのADCと2チャンネルのDACを搭載したFPGAボードとCPUボード、両者のインタフェースとなるDSPボードで構成される。DRFS試験時は10チャンネルのモニタとして使用した。

図5はDRFS試験時に導入された、プラットフォームに μ TCAを採用したシステムで、ERL(エネルギー回収型リニアック)計画のために開発中のハードウェアがベースとなっている。ADCとDACを各4チャンネル搭載したFPGAボードが中心となる。CPUはFPGAチップに内蔵され、OSはLANを介して起動する。



図4 cPCI デジタル FB/FF 系

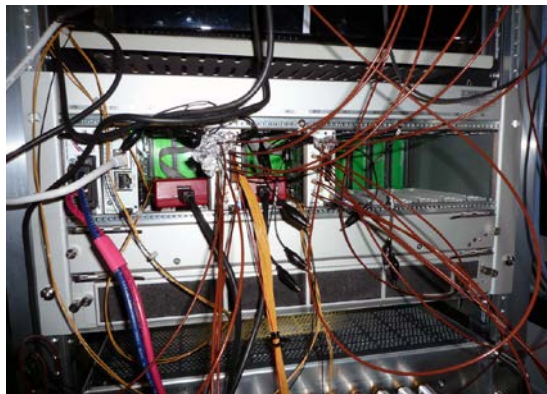


図5 μ TCA デジタル FB/FF 系

3. IF ミックスモニタ系

ILCでは1台のクライストロンで20台以上の超伝導空洞を駆動する案もあり、FB制御を行うために多数の空洞ピックアップ信号を取り込むことが求められる。

IF ミックス方式は、複数の高周波信号を各々異なる周波数にダウンコンバートした後に混合し、ADCに入力する。通常のIF方式と異なり、各々のIF信号は90度毎にサンプリングされる訳ではないため、I/Q成分に分離するための演算は複雑になるが、ADCの数を抑えつつ多チャンネル化することが期待される。S1グローバルでは、前節で述べたcPCIのFB/FF系と同じハ

ードウェアを用い、FPGA上に構成する回路のみの変更することでADC1つ当たり3つ、計30のIFを測定する試験を行い、モニタとしての動作だけでなくFB制御も可能であることが確認された。

4. 34チャンネルADCボード

多チャンネルモニタの1つの案として、通常のIF方式で使用する34チャンネルのADCを実装したFPGAボードの開発も進めている(図6)。IFミックス方式はADCの数を抑える利点がある一方で、I/Q成分の演算のディレイが大きくなる事、LOやIF生成系及びミキサ等の構成が複雑になる事が欠点として挙げられる。多チャンネルのADCを実装する方式では、必然的にFPGAへの入力信号数も多くなりボードの設計が難しくなると考えられ、それぞれ一長一短がある。DRFS試験では、この34チャンネルADCボードの動作試験を行い何度かの改良を経て、有効なデータを得られることを確認した。今後、IFミックス系と比較した性能評価、開発を継続していく予定である。



図6 cPCI 34チャンネルモニタ系

5. パワーメータによる測定系

超伝導空洞や大電力高周波系の性能を評価する上で、電力の絶対値を正確に測定する必要があるため、これまで述べたようにIFをデジタル的に測定するだけでなく、1.3GHzの高周波信号を直接パワーメータで測定するシステムも用意されている。図7はDRFS試験時の構成で、2チャンネルのパワーメータ6台を常備し、4台の空洞のピックアップと反射波、2台のクライストロンの出力進行波、反射波を測定する。またデジタル系モニタの校正にも使用される。

パワーメータ増設の要望は多いが、導入とメンテナンスのコストの問題で難しいのが現状である。また、センサの個体により測定値に差が出るのが問題となる場合もあり、今後の課題となっている。



図7 パワーメータとパワーセンサ

6. まとめと今後の予定

STF での S1 グローバルでは予定されていた項目を無事消化することができた。現在は、次に予定されている量子ビーム実験に向けた準備を進めている。LLRF 系では、 μ TCA の FB/FF ボードや 34 チャンネル ADC ボードの開発を継続するほか、いくつかの新たな試みもある。最後に、このうちの 2 件を紹介する。

(1) 検波器を使用した簡易パワーメータ

パワーメータ増設の要望に低コストで対応する案として、検波器と FPGA ボードを組み合わせた、簡易パワーメータの開発を検討している。図 8 のような検波器の入出力特性の校正データを FPGA 上に持たせ、ADC で測定した電圧から入力電力をリアルタイムに求める。開発には、ADC/DAC を各 2 チャンネル搭載した市販の FPGA 評価ボードを用いている (図 9)。パルス内の任意のタイミングでの電力値をリモートで読み出すほか、検波後のパルス波形の出力 (オシロスコープでの観測用)、データロガーによる記録のための DC 出力など、5 章で述べた汎用パワーメータと同等の機能を持たせる予定である。

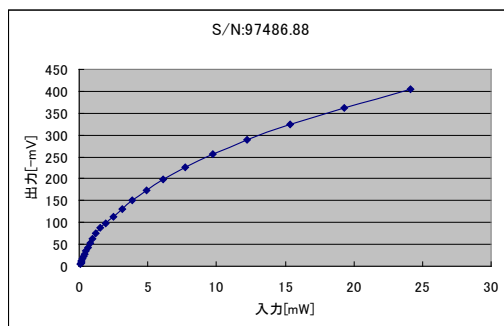


図8 検波器入出力特性の一例

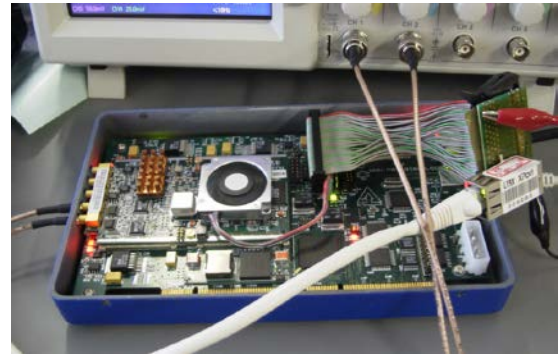


図9 XtremeDSP ボード

(2) ダイレクトサンプリングによる I/Q 復調器

これまで述べてきたデジタル FB 系及びモニタ系では、元の高周波信号から IF にダウンコンバートした信号をサンプリングする方式をとっている。近年、ADC の広帯域化、高速サンプリング化が進み、1.3GHz を直接サンプリングすることが可能となっている。高周波信号を直接測定することで LO や IF 生成系が不要になり、これらの位相ノイズ等に起因する測定エラーも排除されると期待される。図 10 は周波数帯域 1.4GHz、最大サンプリング 400MHz の高速 ADC と FPGA ボードを組み合わせたデータ収集系である。高周波信号を直接 ADC に入力することから、ダイレクトサンプリングと呼んでいる。IF 方式と異なりサンプリング速度が高周波信号の周波数より低いいため、I/Q 成分を求めるには数波長分サンプリングした後、重み付き平均を取る必要がある。S1 グローバルでは導入しなかったが、これまでの試験では図 10 のシステムで取得したデータを基に、ホスト PC 上で I/Q 成分を算出した結果、IF 方式による測定値と一致した値が得られた。FB 制御に使用するには I/Q の演算を FPGA 上で行う必要があるため、今後 I/Q 復調器回路を FPGA に組み込む作業も進めて行きたい。

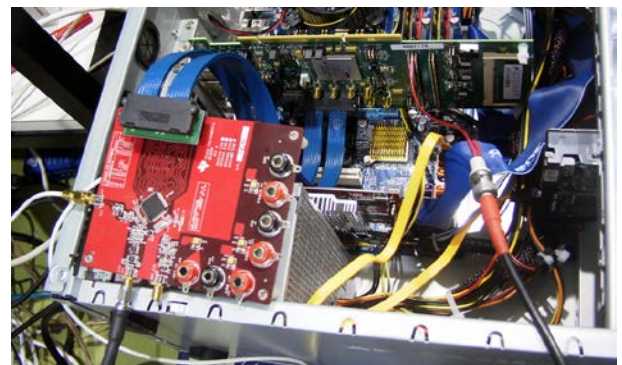


図10 高速ADCを使用したダイレクトサンプリング試験用のセットアップ

技術とのかかわり

素核研 鈴木善尋

はじめに

この文章はちょっと奇異に感ぜられる事でしょう。技術交流会ということですので、本来の趣旨、この技術交流会の第一回が 1975 年にあったのですが、そこでの交流会の目標、研究所内における技術者の横のつながりを持つこと、技術者の得た知識、技術の交換及び問題解決の場としたい。貴重な知識、技術、データ等を文書にし、蓄積し、今後の技術活動に役立てる、それに近い形になるようにしました。今回のテーマは「KEKを支える技術」と大変大きく、どういう内容にまとめるかといろいろな事を考えました。ともかくまとめましたが、内容があちこちと飛びます。中ほどには、初期の頃の交流会での馬場斉技術部長の談話、録音テープから書き取った部分があります。その当時、交流会の内容をまとめて出版するかの議論もあったのですが、技術部に予算がついたら・・・ということで出版されなかった物です。で、今回、陽の目を見ることとなりました。そこからは、その当時の技術職員の立場、仕事への取り組みが分かります。技術職員皆様の仕事への取り組みの参考になれば幸いです。

技術とのかかわり

最近では東海での時間が多いので、皆さんと会うことが少ないです。東海ではハドロン、ニュートリノのビームラインの電源装置を担当しています。昨年秋にハドロンホールの K1.8 に続く K1.1 のビームラインも完成し、去年の 10 月に無事動きました。その後 11 月からニュートリノビームラインの通常運転になりました。そちらも順調に動作しています。そんな訳で、やれやれ、やっと息が抜ける・・・という心境でおりました。とはいえ運転中は東海で毎日電源の運転状況をチェックするのですが。

昨年 12 月のある日、突然つくばの方から PHS が鳴り、何事だろうか・・・、高力さんからでした。「メールでお願いしている件ですが・・・」、エッ何だろう？技術部関連のメールを読んでいなかったのです、実は。私は定年ですから、いろいろな事から解放されると思い、少しハッピーな気分でおりましたので。

「技術交流会発表者募集

下記の案内を既にご存知だと思いますが、「KEKを支える技術」でお話ししていただけないでしょうか。発表は 15 分なので、トラペン 10 枚くらいで済むと思います。後で報告書も書く必要がありますが、出来る範囲で簡単でも結構です。

私の本音は退職記念講演を兼ねて鈴木さんをお願いしています。

視点を変えて「KEKを支えた技術」でもなんでも、鈴木さんなら面白い話をしていただけたらと思っています・・・」

そのようなことから、いつもの成り行きとして・・・

「KEKを支える技術」・・・ですか。支える？それは柱？そもそも技術とはなんだろう？私とどのように関係するのだろうか？改めて、しばらく考えました。いろいろ振り返ってみますと、自分自身がいろいろな技術や人の支えによって生きてきたのだと思います。

KEKの仕事とは関係の無いいくつかのことを振り返ってみたいと思います。私は、PCのデスクトップに、自分の故郷、飯山の写真をはってあります。5月の菜の花公園です。菜の花畑のバックに流れる川は千曲川、写真中央の赤い橋は大関橋といい昭和40年12月に完成したものです。橋の左側の集落は大倉崎、右は関沢です。この鉄橋の完成以前は、そこに木造の橋がありました。橋は台風、大雨の増水で流されます。その時は渡し船になります、船の方が多かったと思います。小さい頃母に手を引かれ良く行き来しましたが橋の袂に三つのお地藏さまがありました。それは、川の水が増えた時に橋が流されないように分解し取り外す作業中に流され亡くなった村人のものだとのことでした。橋の反対側の袂には、茅葺の民家が数軒あり、その内の一軒は西向きで川の方を向いた家で、皆「金蔵さん」と呼んでいました。江戸時代から川の渡しの仕事をし、「金」の付く名前が許されたようでした。昭和のそのころは橋の維持をしていたのでしょうか。その家の横の通りには橋桁に使う太くて長い丸太が何本も積んでありました。道は丸太をちょうなで削った木屑でちらかっておりました。

小学校の二年か三年ごろのことでしたが、千曲川が増水し危ないとのことで、全児童は昼ごろ学校から帰されました。天気の良い日でした。私は家から川の方へ行ってみると、川の水は増水していましたが橋の袂まで行けました。村の人たちが大勢集まり、橋の板を外し終わった頃で、橋は渡れない状態でした。幾つもの鳥居のような橋脚が濁流から少し頭を出し、その上に二列に並べられた橋げたの丸太が向こう岸まで延びていました。向こう岸にも川を見ている人が大勢いる。やがて水かさが増してきて、堤防の方へ逃げろということになり、皆ぞろぞろと堤防の上まで戻りました。今度はそこから、遠くの川の濁流を眺めている。遠くの方の畑から少しずつ静かに水に浸っていくのが見える。堤防の足元まで水が増えてきたころ、橋の方から、水没しそうな細い一本の土手の上をふらふらしながら逃げて来る人がいる。私はそれを見てはらはらしましたが、灌漑用の大切な揚水ポンプを見ていた人かもしれないと思いました。川はどんどん水かさが増し泥水が盛り上がって北へ北へと流れて行く。とうとう堤防の外は見渡す限り濁流となり、ところどころに大きな木の頭だけが見える。堤防の上では消防団の法被を着た人など大勢が川や堤防の様子を見ている。夕方頃には水かさがさらに増し堤防を越えるのに後1メートル程にせまった。濁流は向こうの山のふもとまでの大きな流れとなりいろいろな物を押し流して行く。遠くを緑の葉を茂らせた大木が根こそぎ流れて行く。足元の方を見ると、何匹もの蛇やネズミがこちらの方へと泳いでいるがどんどん流されて行く。夜には、川の流れは遠く離れた私の家の庭でもゴーゴーと音が聞こえるほどでした。一夜明けて堤防は無事でした。大人の話によれば、上流の何がしの村の堤防が切れたので水位が下がりこちらは助かったと

か。その後、川の水は引きましたが、橋は橋桁などが流れ紛失し、簡単に元にもどせない。関沢への行き来はローテクの渡し船に戻ります。川に一本のワイヤーロープが渡してあり、そこに滑車が架けてある。その滑車から綱が伸びて船の舳先に掛けてある。綱を舳先の右側に掛けると、船は左の関沢の方へ動いて行く。向こうから戻るときは、舳先の綱を左側へ移す。村の人が交替で船頭をする。あちらの人をこちらへ、こちらの人を向こうへと、川岸の渡し場へ来る人がいれば只で渡す。遊んでいる子供や自転車も乗せる。橋や船はローテクですが、地域社会を支えるための大切なものだったと感じます。

別の話になりますが、中学一年になった理科の最初の授業は屋外でした。先生が皆を引き連れ田んぼの真ん中へ行き、四方の山々を指差し、山の成り立ちや地震の話をしてくれたのです。覚えていることは、善光寺地震の時に、北竜池の堤が崩れ、土石流が発生し、その下の小川に沿った集落が千曲川へ押し流されたということです。北竜池はこの写真の右側の奥の山の中腹にあります。私の四五歳の頃でも、関沢の多くの家は山からの小川の水を家の庭まで引き、そこに屋根を掛け、米を研ぎ鍋釜を洗うために利用していました。そのようなことも、生活を支える大切な技術だと思います。しかし、今は、小川は汚れ全く見る影もありません。

この写真の左側の山の頂上にテレビの中継所がありますが、これを黒岩山、その下の斜面は信濃平スキー場でした。ここも善光寺地震で酷い被害があった。高校の頃か、バイクか何かでこの黒岩山へ登りました。その当時、頂上は観光地ではありませんのでひっそりしておりましたが、目を引くそれなりの松の木が一本と、その下に大きな石碑がありました。読んでみるとおおよそ次のようなことが彫ってある。大きな地震があつて被害が出た。命が助かっただけでも良かったと喜んだが、しばらくして田畑に山の上の桂池から水が下りて来ないことが分かった。池の手前で土地が隆起し、水が下の田畑へ落ちないことが分かった。田畑の収穫が無くなり餓死者が多く出た。これを救うために庄屋、清水某は日本中から腕の良い隧道（トンネル）掘りの職人を集め、山の隆起した部分にトンネルを掘った。その費用工面のために庄屋は田畑を売り払い破産した。そして、長男某はどこそこの村へ養子として行き、娘某はどこそこへ売られ、某はどこそこへ……。村民は庄屋某に深く感謝し、このことを忘れることなく子子孫孫へ語り継ぐためにこの碑をたてた……。いろいろ考えさせられ、なんとコメントしたら良いのか分かりませんが、忘れられないことです。

高校三年の時のことだと思いますが、大晦日の夕方、母から、どこそこの家でテレビの調子が悪く困っているので見てもらえないかとのことで出向いて行きました。普通の農家で、黒い板戸と障子戸で仕切られた十畳程の座敷に、四五歳と思われる赤い半纏（はんでん）を着た女の子とそのおじいさんが炬燵にあたっていました。その向かい側にテレビが四本脚で立っている。NEC製のテレビでしたか。ラスター、音声は正常にノイズを出す、放送が受信出来ないのです。故障場所を調べるために、真空管回路の後段のほうから順にノイズを加えテストしますと、チューナの真空管が動作不良と分かりました。真空管はと

見ると、あまり見かけないニュービスタなので、どうしようかと思案しつつ再確認しました。やはりこれだと決心し、さて、これを何処で手に入れるかです。街の何処の電機屋に在庫があるだろうか、不安がよぎります。私の足はタイヤにチェーンを付けたカブ（原付）なので、とにかく、それで雪の中を出かけることにします。ダメもとで、最初に三つ離れた小沼地区の、顔は知らないのですが、またいとこの兄の電機屋を訪ねました。そこで運良くニュービスタを手に入れることができました。戻って、それを取り付けると、テレビは完ぺきに治りました。ブラウン管もほとんど劣化の無い新品に近く、良いコントラストで驚きました。しかし、昨日、今日の突然の故障とも見えませんし、ニュービスタは小さいので寿命が短いのかななどと思いました。とにかく、これでこの子もNHKの紅白を見て歳が越せるなと思い、ほっとしました。また・・・、私はこの子の両親はどこかで一生懸命働いているのだなとも思ったのです。

話を元に戻しますが、辞典によりますと、「技」は手足を上手く使って仕事をする事等と書かれています。また、「術」は長年の間に出来た手立て、やり方などと書かれています。「仕事」とは、古い意味では、仕える（官職）・・・世のために尽くすという事でしょうか。自分流に解釈すれば、「技」は「てへん」に「支える」ですから、手や足を使って社会に役立ち、助け支えて行く事とも考えられます。「てへん」と「支える」を組み合わせた漢字の「技」には深い意味があると感じます。「くちへん」に「支える」とした場合はどうでしょうか。「かねへん」に「支える」ではどうでしょうか。やはり「てへん」が相応しいです。そのように考えますと、英語のエンジニアリングは「技術」と訳されますが、「漢字の技術」とは根っこの部分では大変な別物ではないかと感じられます。

KEKを支える・・・KEK と言えば加速器でしょうか。「KEKを支える技術」と言えば、職員であれば、それは真空とかRF、超伝導、電磁石、電源、それらの制御技術を思い浮かべます。「KEK 支えるもの」というとどうなるでしょうか。いろいろあります。まず、日本国民と納税者です。次に現在の社会基盤です、道路、鉄道、電力、ガス、通信、上下水道、病院、学校、住環境等です。この社会基盤は、技術にたずさわる多くの人たちの「手」や「足」により絶え間なく維持され続けることにより機能を果たします。このように考えますと、KEKの加速器が動くということは、全く感謝しようもない、顔の見えない、多くの人々によって支えられて動くということに気が付きます。

さて、KEKの12GeV-PS加速器は数年前にシャットダウンしましたが、長い間運転し続け、物理実験の成果を上げてきました。装置が完成することも大変な技術ですが、それが維持されて役に立ち続けること、そのような全体を技術と云うのではないのでしょうか。そのようなわけで、自分の仕事を振り返ってみて、少し勇気が湧いてきたのです。つまり、良い仕事をしたのかなと。カウンターホールの電磁石電源を製作し、無駄に捨てることも無く、ずっと維持管理してきたことに・・・貴重な国民からの税金で作られたものですから。

そんなことから、自分の仕事を振り返って、あれや、これやと古いノートや資料をひっ

くり返していますと、面白いもの、全く忘れていたものが出てきた。この技術交流会の第一回からの資料です。その当時、技連（技官連絡会）と技術部があり、混沌としていました。私は技官どうしが仕事を上手に進めるための情報交換の場があったら良いなあと思い、技術部長の馬場さんに相談したところ・・・以下のようなことになりました。技術交流会での馬場部長の挨拶・談話の録音を書き取ったものです。この資料は、その当時、技術部に予算が無く印刷出版されていなかったものです。大変良いお話ですので紹介いたします。

技術交流会・第一回 テーマ：マイコン・パソコン

1985 年 5 月 15 日 午前 10 時～12 時 1 号館 談話室にて開催

[技術交流会を催すにあたって]・・・(目的)

研究所内における技術者の横のつながりをもとこと、技術者の得た知識、技術の交換及び問題解決の場としたい。貴重な知識、技術、データ等を文書にし、蓄積し、今後の技術活動に役立てる。

[技術部長の挨拶（馬場 斉）]

技術交流会という話があり、その前から技連の方から配布した物が私の方へも来ており、こういう事を始めるのだなと思っていました。それで、これを技術部として手がけてもらえないだろうかという話がありまして、私自身は、技官の皆さんが発案、奮起やろうということは良いことでもあるし、全面的にサポートすることにしました。ただ過去を振り返ってみますと、数年前になりますかね、勉強会というものを毎週でしたか、週二時間もらいまして、やっていました。それが何時の間にか立ち消えになってしまったというのが現状で、それから系の方でも、教官の方が講師になりましてかなりの期間続けたのですが、何時の間にか立ち消えになってしまった。そういうことで、あまり長続きしないです。これでは意味がない。つらつら感ずるのですが、ここの技術部というのは、建前上は課があり、係がありチャンとしているのです。しかし皆さんの職場は研究系の方へ出向している。そちらの方の業務命令で仕事をしている。皆さんから毎年アンケートを取っているのですが、それに技官の交流が少ないと書いている人が多いです。たとえば、技官は大学から高校出身までと、それから係長、課長、経験年数も違うし、技術レベルの高い人もいる。そして、同じ職場に居るにもかかわらず、指導という事をしない。このことは、ちょっとおかしいのではないかという意見もあるわけです。私も常にそういう事を感じているのですが、ただこの技術部の歴史を考えると出発点はそういう所には無かったわけです。初代の技術部長から私が引き継ぎをしまして、一つの部としての活動を何かしたらどうかと考え、技連の方に話した事が何遍かあります。しかしそういう時の返事はネガティブで、課長に集まっていただき、今後どうするかという話もしましたが、平均してあまりやるべきじゃないという雰囲気が強かった。それではいけないと思って何遍か技連の役員の人に何かやろうと持ちかけましたが、二度も三度もえらいお叱りを受けました。それで、その後あまりやっていない。しかし、まあ、毎年一回ないし二回、皆さんが知りたいというテーマがある場合、それを聞きまして研究会、講演会のような物を開いてきました。それか

ら、ここの研究所で以前から工作と分子研との間で交互に研究会を開いていた。最初は分子研だけでやっていたが、ここに共通系のデータが加わり、それで盛んにやるようになった。それからここの研究所でも分担してやってくれないかという話がありまして、主幹会議にはかり了承を得て予算をもらい、研究会を年一回持ち回りでやっています。最初はここでやって、次は分子研、プラ研でやって、今年度は当研究所でやることになっています。今年で四年目になるわけです。この研究会も非常に盛んになりまして、当初ここでやった頃は 170 名ぐらいの参加者でしたが、去年のプラ研の時は 250 名ぐらい集まっているわけです。それで二日間ではとても足りないということで分科会を沢山もうけてやった。このような経過を踏まえて、去年度の最後に関係する三か所の人と、関心があってよく参加する北海道大とか東北大、金研等の方に来ていただき、研究会に対する反省会を開きまして、今後どうするかということも話し合いました。これが技術部の現状です。

そういう段階のところへ、この前この話が出まして、大いに結構だ、技術部として主催してやりましょうという事になった。ただし、これは私一人ではどうにもならないので技官の皆さんに協力していただき長続きするように今後進めてゆこうと話し合いました。これは菊池調整官にも了解してもらっていますし、各系の主幹にも通知を出して、今後こういう事をやりますので、業務に差し支えの無い範囲で皆さんに出席出来る時間を与えて下さいと依頼してあります。それで、今後、これを継続してやっていきたい。

今日は一回目で、一応、テーマはマイコン・パソコンになっています。これを一回だけでなく、ある期間やってある時期になったら別のテーマに変えてもいいと思います。それは皆さんの意見を調整して、そういう議題を逐次もうけて、それで横の連絡を兼ねながら話し合うことによって、技官の人たちの意気も上がるだろうし、また技術的なレベルも上がるだろう、そういうことで考えています。

今日、私は皆さんに言いたい事が有ります。それは、尻切れトンボにならぬようにずっと続けて欲しいという事です。というのは、他の大学の技官は、環境、立場が全て違い、各教室に配属されて補助的立場で仕事をされている。しかし、ここの研究所は補助的ではないのです。教官と対等に仕事をしてく。しかし、仕事の上で知識とか技術力とかいろいろ差のある人もいます。が、教官よりも優秀な人もいます。各系でも、常に対等の立場であると言っていますし、所長もそういう考えです。ところが、技官のかた、技術者のかたは、なかなか素直に発表しないし、意見も言わないひとが多い。それではいけない。思う事はどんどん発言すべきです。自分たちの立場を大いに主張し、技官を認めてもらうことには非常な努力が必要だと思います。やはり、勉強もしなければならぬし、この仕事はいやだ、あの仕事はいやだなどと言っているようではだめです。仕事というものは途中で投げ出しては意味がありません。どんな些細な事でもよいから、ちゃんとまとめ上げる。それで、必要に応じてはレポートを書くなりして、誰が見ても、ああ、あの人はちゃんと物ごとを成し遂げたなあ、という実績を作る事が皆さんの最大の使命であると思いますし、そうして行かねばならないでしょう。

ここは、技術部の技官に転勤というものがありません。しかも、内部の配置転換も少ない。卒業してここに入って来られた人が大部分である。外を知らない。ということで、世間知らずである。非常に視野が狭い。そして、狭い所でぬくぬくしているようにも見える。そうしますと、最近になりまして、他の大学からここに技官として入って来る人が多くなってきた。すると、その人たちはここを奇異に感ずるわけですね。そういう意見も多いです。技術部をなんとかせねばならぬということで、技連の中で議論していることも知っています。それに対して、技術部長として何かビジョンがあれば言って欲しいと言われましたが、私は言う立場ではない。もう少し技官の中で議論して、ある程度のコンセンサスが見えてきたなら、私の意見を言っても差し支えないだろうと考えています。考えようによっては、私はずるいかもしれません。

とにかく、コツコツやって、仕事の上で実績を作りなさい、これがまず一番大切だと。それには勉強をしなければならない、ということを言いたい。皆さんが良くやっているのは承知しています。しかし、まだまだ努力が足りないのではないだろうかと思います。中には非常に優秀で教官よりも高額な予算を使っている人もいます。ですが、平均的にみて、まだ少し眠っているのではないかという印象を受けます。しかし、皆さんがこのような会合を開くという事は、非常にそれを突破するキッカケになるだろうと思います。今後、技術部で取り上げて、息長くやって行きたいと思います。

今日は、第一回目ですから、どちらかというと懇談会形式にしようと、あるいは、一人二人にテーマを発表してもらい、次回からは出来るだけ自発的な申し込みをしていただいて、自分のやっている事を身近な所から話してゆくことで良いと思います。何も高尚な事を言わなくても、どういう所に困難があり、失敗であったとか、あるいは、その解決法はこうであるとか、このような問題で困っているとか、皆の良い知恵はないだろうか、教えてくれないか、このような事から始めて行って良いと思います。聞くは一時の恥、知らぬは一生の恥と言って、とにかく、自分で人の意見を聞くなりしてでも、ただ聴くだけではだめで、さらに自分の考えを織り込んで、仕事を早く完成させる。そして、技官を、系の人あるいはそれ以外の人に知ってもらうにはそれが最も大切なことであると思います。ですから、あまり、形式ばった学会とか研究会とかいう、単なる良い所だけを発表するような事でなく、生のままぶっつけ合っ、皆さんで議論し合っ、それで皆さんの知識あるいは技術を磨いてゆく一助となればと考えます。

ということで、今日の参加者はそう多くはないですが、こういう事をやっているという事を近くの同僚に話していただいて、なるべく出ていただくようにして、美のある会にしてゆければと思っています。

(参加者：19名、報告者：5名、その後討論が続きます)

技術交流会・第二回 **テーマ：マイクロコンピューター**

1985年7月11日 午前10時～12時 1号館談話室にて

[技術部長の挨拶(馬場 斉)]

今日は、第二回目ということで、大変良い事だと思います。このような資料も残るということは、そこに出席していない人でも、ああ、このような事をやっているのだな、と様子が分かります。それから今回も出席者はそれほど多くないですが、出来るだけ出席していただけたらと思います。

今回、急で、皆さんに知らせることは出来ませんでした。八月十八日、十九日に京都の熊取にある原子炉研究所で、技官の研究会があります。それで、今年初めて、高エ研に招待状が来ました。締め切りまでに一週間程しかなかったものですから、私の一存で二名の方を決めさせてもらいました。・・・とにかく、こういう事は、一度出てみると大体の事が分かって安心できるものだけれど、学会もそうですね。初めての人は非常に上がってコチコチになっている。私も若い時はそうだった。ドキドキしてね、演壇に立っても前に誰が居るのやらさっぱり分からない。後になって考えてみると、皆そんな経験をしている。一回やると、次は前に居る人も見えてくるし、ずっと楽になる。皆その難関を突破しなければならない。科研費をもらうためには、論文を出すか、物理学会とかいうような所で発表しないと資格が無く、もらえない。そういう訳で、皆さんには、そういう所へドシドシ出て行って発表していただきたいと思っています。

この交流会は、発表する場に慣れるという効果もあると思います。ただ、ここは所内の集まりですから、ざっくばらんに、冗談の一つでも言いながら、楽しい雰囲気で行きたいと思います。また、今は技連の役員の方で世話役をしてもらっていますが、そのうちには、一年間私が世話役を引き受けましょう、という人が出て来て欲しいと思います。

この勉強会とは直接関係ない事ですが、今、技術部の在り方が皆さんの中で問題になっていますが、今までの事を全面的にひっくり返す事は非常に難しい。しかし、良い所は保存し、どんどん改善して行く。この前、技術部と所長の懇談会においても、所長が、そういう時期でもあり、そういう方向で考えたい、ともおっしゃっています。そういうことで、技術部というものを少しずつ浮き彫りにして行き、教官をも含め多くの人々に、技官はどういう事をやっているのか、あるいは、どれだけの事が出来るのかという可能性や意気を示す努力が必要だと思います。それには行動しかない。ただ大人しくしてはだめです。それで、僕一人ではどうにもなりませんので、皆さんと協力し、このような勉強会から一つ一つやって行こうと思います。

・・・(交流会の途中での技術部長からの発言、以下、転勤希望調査について)

皆さんの所へ配って有ると思いますが、文部省関係の職員の転勤希望の調査があります。皆さんのアンケートなどを見ますと、例えば、私は長男なので、何年か後には、親の面倒を見るので、どこそこへ行きたい、今はそれほど深刻ではないが、というのがかなりあります。これらは、ここへ希望を出しておきますと、これは、相手が在って決まる事なのですが、先方がこれを見て、自分の所に適当だなと思うと声がかかってくる。そういう事で転勤した人もいるのです、実際にね。ですから、こういう機会を利用して下さい。我々としては、ここに居る優秀な皆さんを外へ出したくはありませんがね。しかし、皆さんの人

生の事ですかからね。もし、有りましたら私の方へ言って来て下さい。この事は、決して口外は致しませんから。言って来たからということで、主幹に話したり、あるいは、直属の教官に話したりはしませんので、そのような事を考える事は一切ありません。ただ、相手から声がかかった時には、私の方から上司の主幹なりに話して、庶務を通じて話しを進めてゆく事になります。それ以外の時は、アンケートの内容は誰にも見せませんので、安心して、自由に何でも書いて下さい。ここは閉鎖的ではありませんので、どうぞ私の方へ言って来て下さい。もし有りましたら十九日までに来て下さい。・・・では、まだ時間があるので雑談的にどうだい。・・・〇〇さんだって、この前プラ研で発表して、まず難関を突破したのだよ。六七回リハーサルしたのだよ。それはそうですよ、誰だって初めては、大勢の前ではオドオドしますよ、なかなか眠れないですよ。でも堂々と立派に発表しましたよ。そういう事が成長して行く一つなのです。

どうですか、皆さん何かないですか。別にこのような事に関係ない事でも良いですよ。・・・
・・・雑談が続く・・・

技術交流会・第三回 テーマ：マイクロコンピューター

1985 年 8 月 8 日 午前 10 時～12 時 1 号館談話室にて

[技術部長の挨拶（馬場 斉）]

今日は三回目という事ですが、この会も良い方向へ向いているようですね。皆さんに配りましたこのレポートを見ますと、第一回よりも内容が充実していると思います。報告はまとめてから話すのが良いです。しかし、人には習慣があつてなかなか難しい。出来れば、資料を皆さんに配ってから話しますと、聞く人は分かりやすいですね。なるべくその様な方法をとって欲しいと思います。ただ、この事にはあまりこだわることなく現状を生のまままで話す、それを振り返ってみて不足を補いノートを提出する。それを繰り返している内に仕事や勉強に対する基本的態度が醸成されてゆくと思います。ここは、将来、学会で発表するとか論文を書くとかいう時のトレーニングの場として自発的に利用してほしいと思います。前回にも言った事ですが、技官はどのような仕事をしているのか、研究所の中ではどういう地位に在るべきなのか、皆さんのいろいろな希望も有ると思いますが、それを実現するには他人に分かってもらう必要があります。このような場で発表して資料を残したり配布することによって、技術部の技官の存在を良く理解してもらえるようになると思います。技術部の技官を良い方向へ持って行こうとするのは皆さんしかありません。上から指導されて育つてゆくところもありますが、自分たちで進むべき方向を見出して進んで行くような自発性が無いと、技術部や技官の存在をアピールする事は非常に難しいと思います。・・・

技術部の人事ですが、八月十六日の辞令で私は部長を辞め教官系に戻ります。新しい技術部長は山口さんがなります。辞令が出てから皆さんと懇談の場を持ちたいと思っています。私は今後も技官の方の良き理解者として教官との間の取り持ちをしたり、技官の声となつてずっと皆さんを支援して行きたいと思っています。ですから、今までと同じように

何か心配事が有りましたら部長の所へ行くのは勿論ですが、私の所へ来られても良いです。どうぞ私の部屋に今までどおり遊びに来て下さい。そして、いろいろな事について話し合ひましょう。・・・

J-PARC での私の仕事

私は、J-PARC の建設が始まってからは、いろいろな面で余裕が無くなり、研究会での報告、発表をほとんど行っておりませでしたのでここで報告します。

12GeV-PS がシャットダウンした時に、手持ちの電磁石電源は 240 台以上ありました。電源装置を廃棄したことがないので、古いものは 1973 年製であり、今から 38 年前の製品になります。J-PARC の建設費用を減らすために、つくばでの古い電源装置を始め多くの装置、部品を再利用する方針でスタートしました。

電磁石電源の再利用

つくばのカウンターホールで使用していた電磁石電源 50kW～500kW は仕様として、整流変圧器は入力側 1 次コイルが 2 重または 4 重に巻かれています。500kW 電源を例にとりますと、1 次コイルを全て並列に接続すると、出力は 100%となります。また、コイルを直列-並列に組み合わせて出力を 50%にすることができます。全てのコイルを直列にすると 25%となります。整流変圧器の 2 次側には 3 相半波の整流回路が 4 組あります(12 相整流)。この一つの 3 相半波整流回路定格が 100V-1250A としますと、三つの組み合わせが取れます。全て (4 回路) 並列の時は 100V-5000A、また直並列の時は 200V-2500A、4 回路が直列の時は 400V-1250A となります。入力側のコイル接続の組み合わせと整流回路の組み合わせを合わせますと以下の表-1 のような出力の組み合わせが得られます。

この様に出力定格を切り替えられる電源の特徴は、広範囲の負荷抵抗を持つ電磁石に対して高力率で接続運転できる点です。例えば、25V-5000A にセットすると超伝導電磁石用となります。200V-2500A にセットすると大型のスペクトロメーター電磁石用となります。

		変圧器入力 1 次側		
		500kW 並列 : 100%	250kW 直並列 : 50%	125kW 直列 : 25%
整流回路	並列	100V-5000A	50V-5000A	25V-5000A
	直-並列	200V-2500A	100V-2500A	50V-2500A
	直列	400V-1250A	200V-1250A	100V-1250A
負荷抵抗 $m\Omega$		20～320	10～160	5～80

表-1. 500kW 電源の定格出力の組み合わせ (切り替え可能)

このような仕様の電磁石電源がカウンターホールから 240 台、定格出力別で 16.5kW～500kW までの 31 種類の物が放出されます。それらは J-PARC のビームラインのどのような電磁石をも効率良く運転出来る仕組みとなっていますから再利用しないという手はありません。

電磁石電源関係の執行額

J-PARC ハドロンおよびニュートリノビームラインへつくばから電磁石電源を移動して据え付け配線、さらにそのコントロールシステムを立ち上げる仕事は、2004 年から始まりました。最初は、東、北カウンターホールの電磁石電源、再利用できる物の切り離しとその整備です。その間に、東海の現場確認、仕様書の作成となり、徐々に東海での仕事を中心となって行きました。その仕事をまとめると以下ようになります（表-2）。

年度	執行額（円）	電磁石電源関係・仕事内容	備考
2004	55,354,139	電磁石電源切り離し、整備	つくば作業
2005	49,074,726	電磁石電源切り離し、整備	つくば作業
2006	200,409,182	ハドロン SY 電源配線(1)	東海作業
2007	111,278,369	ハドロン SY 電源配線(2)制御配線 NU 用ケーブル準備	東海作業
2008	58,605,981	K1.8BR 電源制御配線・完成 NU 電源制御配線・完成	ビーム確認 2009/02
2009	86,614,443	K1.8,KL,FM 電源制御配線・試運転	NU 運転開始
20010	30,488,842	K1.1 電源制御配線・試運転	2010/10 確認

表-2. 2004～2010 年まで仕事と予算執行額

執行額の合計は 591,825,682 円（約 6 億）です。次に再利用した物品について考えてみると、以下の表のようになります（表-3）。

再利用物品	数量	金額（円）
電磁石電源	124 台	1,054,000,000
電源コントローラ・制御盤	19 セット	57,000,000
ホーン用パルス電源	2 セット	120,000,000
ホーン用パルス変圧器	3 セット	60,000,000
電力ケーブル再利用	10km	280,000,000
バーンディーコネクター	750 個	3,322,500
3/4'ボールバルブ、カプラ等 ゴムホース、ブレーカー	1 式	5,000,000
	合計	1,579,322,500

表-3. 再利用品の金額

以上をまとめますと以下の表-4 になります。

ハドロン、ニュートリノ電磁石電源関係建設費用のまとめ	
実際に使用した金額	591,825,682
再利用物品の金額（削減額）	1,579,322,500
全て新規に調達の場合（合計）	2,171,148,182

表-4. 費用のまとめ

ビームライン電磁石電源関係の建設費は、電源等の再利用により、必要額の 27%で完成した。

制御関係の開発

電磁石電源の制御関係の開発はほとんどつくばで完成していた。ハドロン、ニュートリノの立ち上げはスムーズであった。理由は、つくばの既存のシステム（ニュートリノビームラインの制御装置：全て再利用）にデータベースを追加する事が開発部分であり容易だった。使用したデータベースは MySQL であり、フリーのソフト、費用ゼロである。

その開発については、以下の所で報告しています。

1. Beam Line Control and Database PCaPAC 2005 年 3 月
2. ビームラインの制御とデータベース 大阪大学技術研究会 2005 年 3 月

超伝導電磁石電源関係の制御

常伝導電磁石電源の制御システムと一体にするために、超伝導電磁石電源用のコントローラを開発した。開発に使用した部品は、Z80-CPU ボード、それらに付随する入出力ボード等を使用した。機能としては、電源装置の運転の自動化、一連の運転操作をそのコントローラに行わせること、電流設定の上昇速度は毎秒 1A から 10A までプログラム可能の可変となっている。この装置も 2009 年 3 月に完成し、4 月から運転に使用されている。この超伝導電源のコントローラの開発は、既存の CPU ボード等を再利用したので、費用ゼロである。

まとめ

J-PARC ハドロン、ニュートリノビームラインの建設は、電磁石電源とその制御システムをつくばから移動、再利用した。その部分の建設費は少なく見積もっても 22 億円必要であるが、実際の費用は 6 億円弱（27%）であった。電磁石電源等は十分な性能を発揮し、不都合なく運転されている。たしかに、それは 1 アンペアの電流は 1 アンペアであり、何十年前の 1 アンペアの電流と今流れている 1 アンペアの電流の間に違いはない。それが科学であり、技術だと思う。建設費用の削減ができたのは、再利用出来る装置、品物（それは国民の貴重な血と汗、財産、税金）があったことによるが、それに精通し、それを生かせる人材も重要だと感じられる。

編集後記

今回の技術交流会は、加速器研究施設の担当でおこないました。また発表の募集にあたっては、各研究所、研究施設の世話人を選任してもらい御尽力いただきました。

今回のテーマは誰でも発表できるように「KEKを支える技術」して発表者を募集しました。発表総数9件、聴講者総数約80名で、活発な質疑応答もあり、盛会の内に終了することができました。今回の交流会をきっかけとして、技術者間の交流がさらに深められることを期待します。

発表者の皆様と、世話人をしていただいた素核研の高力孝氏、物構研の牧村俊助氏、共通基盤研究施設の大久保隆治氏に厚く御礼申し上げます。

平成22年度技術交流会実行委員

久松 広美

坂井 浩

柿原 和久