KEK Internal 2010-2 June 2010 A/H/M

平成21年度

KEK 技術賞 受賞論文集 The KEK Technology Prize 2010

3

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

High Energy Accelerator Research Organization

© High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2010

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

平成21年度KEK技術賞専門部会

部会長 上野 健治

KEK 技術賞は平成12年度に発足し、これまでに優れた技術がその賞の栄誉を受けられ、 それぞれの受賞者はさらなる研鑽を積まれて機構のプロジェクトにかかわる技術の開発・ 発展に活躍され、技術賞受賞の成果は勿論、関連する多くの実績と成果を残している。KEK 技術賞の高さは技術開発者から注目に値するものです。

平成 21 年度 KEK 技術賞は、6 件の推薦があり、創造性、具体化、貢献及び伝承の4項 目の選考基準について審査(申請内容、本人によるプレゼンテーション及び開発現場での 説明)を実施しました。特に、各テーマとも開発時の取り組み方については、開発者が直 接説明をされており、その開発意欲の熱意が良く伝わっていたと思います。今回受賞され た5件は、いずれも技術の具体化、貢献という点において、4項目の中で特に優れている ことが高く評価されました。今後も受賞者の方々のさらなる研鑽を期待します。

機構を取り巻く新技術開発環境が激変する中においても、KEK 技術賞の価値はなんら変 わることはなく、今回の技術賞受賞論文においてもその成果は現在はもとより、将来にも 十分生き残る財産であることは、論文を読んでいただければ理解されると思う。併せて、 人材育成の面から、また機構における技術開発が技術完成までに長期間を要すこと、かつ 大型テーマになってきていることから、関係者各位の一層のご理解をお願い致します。

平成21年度 KEK技術賞 受賞論文

目 次

序文

受賞論文

1.	J-PARC におけるミュオン生成標的の開発 ······ 牧 村 俊 助(物質構造科学研究所)	L
2.	水素炉を用いた金属接合技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	ł
3.	TOチョッパー制御・計測システムの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・)
4.	EPICS on F3RP61の開発と応用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
5.	J-PARC Main Ring のシステムコミッショニング2 2 大 越 隆 夫 (加速器研究施設)	2
編集	〔後記 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2

J-PARC におけるミュオン生成標的の開発

牧村 俊助 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所、ミュオン科学研究施設 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

J-PARC ミュオン科学研究施設 (J-PARC/MUSE) では 3GeV、333 µ A の陽子ビームによって世界最高 強度のパルス状ミュオンを発生させ様々な素粒子、 物性実験を実施しています。ミュオン生成標的は物 質生命科学実験施設内の中性子標的上流に位置し、 ミュオン標的を貫通した陽子ビームは中性子標的ま で輸送されるのでミュオンと中性子を同時に用いた 実験が可能となっています。本報告では J-PARC にお けるミュオン生成標的に関して報告いたします。は じめに第一章ミュオン生成標的の概要および世界に おける位置づけを述べ、第二章ではミュオン標的の 設計で留意した点、特に静解析に関して述べます。 第三章では、ミュオン標的の製作方法、特に銀ロウ 付けに関して述べ、第四章では、J-PARC における 300kW 運転でのミュオン標的の挙動を報告します。 最後に第五章では、まとめ及び今後の予定を述べま す。

1. はじめに

崩壊してミュオンを発生させるパイオンは厚さ 20mm、直径 70mm の等方性黒鉛で作られます。黒鉛 の周囲にはステンレス配管が埋め込まれた銅フレー ムが配置されます。図1にミュオン標的の写真を示 します。



図1;ミュオン標的の写真

これまで英国 ISIS/RAL 研究所において 160kW の 陽子ビームによって厚み 10mm の黒鉛上で1 秒あた り 1.2×10⁶ 個(表面ミュオン)の世界最高強度のパ ルス状ミュオンが発生していました。このとき黒鉛 上では 1kW の熱が発生しています。一方、J-PARC におけるミュオン標的では 1MW の陽子ビームによ って厚さ 20mm の黒鉛上で ISIS/RAL の 10 倍以上の 1 秒あたり 1.5×10^7 個 (表面ミュオン) のパルス状ミ ュオンを発生する計画です。このとき ISIS/RAL の約 4 倍の 3.9kW の熱が発生します。表 1 において J-PARC/MUSE ミュオン標的と ISIS/RAL のミュオン 標的を比較します。

	陽子ビー ム強度	黒 鉛 標 的厚み	標的上のビ ームロス	表面ミュ オン数/秒
ISIS	160kW	10mm	1kW	1.2×10^{6}
MUSE	1MW	20mm	3.9kW	1.5×10^{7}
WIUBL	1101 00	2011111	J.JKW	1.5×10

表1; ISIS と MUSE の標的の比較

2. ミュオン標的の設計

陽子ビームによって真空内に設置されているミュ オン標的上では約4kWの熱が発生しますが、ほとん ど全ての熱はステンレス配管内を流れる冷却水によ って取り除かれます。黒鉛材と銅フレームの境界部 には、その熱膨張係数の違いから黒鉛材の引張り強 度とほぼ同じ大きさの応力(39MPa)が発生するこ とが、有限要素法を用いた計算によってわかってい ます。そのため黒鉛と銅のちょうど中間の熱膨張係 数を持つチタンを、その境界に挿入しました。その 結果として黒鉛材に発生する引張り応力を大幅に小 さくすることができました(8MPa)[1][2]。表2では チタン層のある場合とない場合の黒鉛上での応力差 と黒鉛材の応力強さを示します。

	引張	圧縮	せん断
応力強さ	37MPa	90MPa	45MPa
チタンなし	35MPa	40MPa	17MPa
チタンあり	8MPa	42MPa	6MPa

表2; チタン層のある場合とない場合の黒鉛上での 応力差と黒鉛材の応力強さ

黒鉛材は陽子ビームに照射されることによって損 傷され、寸法が変化していきます。ビームスポット 上では一年につき1dpaの放射線損傷が発生しますが、 黒鉛材はビームスポットにおける温度条件下では 1dpa につき約1%の収縮が起きることが、中性子照 射実験によって予想されています[3]。これらの放射 線損傷を考慮すると半年で黒鉛上に引張り強度と同 程度の応力が発生すると計算されており、この放射 線損傷が現在のミュオン標的の寿命を決定していま す[4]。

3. ミュオン標的の製作

3.1 ミュオン標的の製作法

黒鉛材の周囲に黒鉛より熱膨張係数の大きなチタン、銅を配置しようとすると、常温で同寸法である 黒鉛の外径とチタンの内径、またチタンの外径と銅 の内径は、その接合温度では寸法差が出来てしまい 接合することが難しくなります。よって、3度のテー パーを持った黒鉛円盤をチタンリングと共に銅フレ ーム内に高温で押し込む手法を採用しました。よっ て、最初にステンレス配管を銅内に HIP (Hot Isostatic Press)法にて埋め込む事によって銅フレームを製作 し、続いて銅フレーム、チタンリング、黒鉛をロウ 付けしました。この時、チタンのベータ変態温度を 超えないように銀ロウ付けを選択しました。図2に ミュオン標的の製作手順の概念図を示します。



図2;ミュオン標的の製作手順の概念図

3.2 銀ロウ付け手法の開発

上述のように黒鉛材を銀ロウ付けすることを計画 しましたが、濡れ性の悪いことから黒鉛材はロウ付 けすることが困難な材質として知られています。よ って、我々はいくつかのロウ材、手法を比較して最 適なロウ材、手法を採用しています。結果として原 子炉で用いられる C/C 材をロウ付けするときに用い た特殊な銀ロウ材で等方性黒鉛材を事前に金属化し たのちに、通常のロウ材にて接合しました。しかし ながらミュオン標的は図2に示すように通常のロウ 付け条件とは異なる接合法を採用するために、この 場合の接合の健全性を確認するために実際の手法で 製作した摸擬体より切り出した試験片により曲げ試 験を行い健全性を確認しています。実際のビーム運 転時には接合界面には引張り、せん断応力が発生す るのですが、曲げ試験の中立面に対して垂直に接合 面を設置する場合には、目標とするせん断応力に達 する前に引張応力によって黒鉛材が破損してしまう ことが計算によってわかりました。よって、接合界 面を中立面に対して45度傾けることによってこの問 題を回避しました。結果としてロウ付け接合部は十 分な強度があることを確認できました[5]。図3に接 合サンプルの曲げ試験の写真を示します。 図3;接合サンプルの曲げ試験の写真



4. J-PARC における運転状況

2008/9/19 にミュオンビームが確認されて以来、 徐々に陽子ビーム強度が増強され、120kW 連続運転 に至っています。このとき、すでに J-PARC/MUSE、 D2 ラインにて発生する1秒あたりの表面ミュオンの 数は ISIS/RAL の表面ミュオン数を超えています。ま た、陽子ビーム強度 330kW にて 5 分 5 セット (2009/12/7) および 300kW にて 1 時間 1 セット (2009/12/10) 運転試験を行いました。このとき J-PARC/MUSE では ISIS/RAL の三倍以上の一秒あた りのミュオン数を確認しました。

ビーム運転時にはミュオン標的の冷却水入口温度、 出口温度、冷却水流量、ミュオン標的銅フレーム外 側温度、銅フレーム内側(上下左右)の温度を熱電 対にて計測しています。この冷却水温度上昇、流量 からミュオン標的における発熱量を評価することが 出来ます。陽子ビーム 330kW 運転時には PHITs [6] を用いた評価では黒鉛上で 1300W の発熱が起きると 予想されていました。流量計測の精度があまり良く ないために計算値と誤差があると推測されますが、 1200W の熱が発生していたと実測されました。この とき ISIS/RAL のミュオン標的で発生する 1kW の発 熱を超えていたことが確認できました。

また、計測したミュオン標的の銅フレーム温度を 有限要素法の計算と比較しました。計算上は配管内 面と冷却水間の熱伝達係数は実際の流量に則した 12600W/m²/K、冷却水温度 30℃を採用し、取得した 計測値を 30℃と比較出来るように標準化しています。 温度計測箇所および銅フレーム温度の計算値と実測 値の比較を図4に示します。計算上は黒鉛標的、チ タン層、銅フレーム、冷却水配管を軸対称モデルに てミュオン標的を形成しています。実際にはミュオ ン標的は固定板に固定されており、熱平衡に達する 時間が長くなっているように見受けられます。また、 実際のビーム運転の際には計算に用いた銅の熱伝導 度(380W/m/K)よりも大きな熱伝導が得られている と推測されます。計算よりも良好な冷却性能が達成 されている事が確認できました。





値と実測値の比較

5. まとめ、今後の予定

J-PARC/MUSE では世界最高強度のパルス状ミュ オンを得るためにミュオン標的の開発、製作を行い ました。特に黒鉛と銅フレームの熱膨張係数の違い から発生する応力の問題を解消するためにチタン層 を挿入し、その問題を解決しました。また、黒鉛材 の放射線損傷によるミュオン標的の寿命評価を行い

ました。ミュオン標的の製作の際には、HIP 接合、 ロウ付け手法を採用し、特に銀ロウ付け法に関して は何種類かの手法、ロウ材を比較し、また接合の健 全性を曲げ試験にて確認しました。このように製作 したミュオン標的を実際の陽子ビーム運転に導入し、 設計の妥当性、健全性を確認しました。陽子ビーム 330kW 運転の際には、一秒当たりに発生するミュオ ン数、標的での総発熱量が ISIS/RAL を超えているこ とを確認できました。

ミュオン標的は陽子ビームに照射されると高度に 放射化するために人が全く近づく事なく、遠隔操作 にて交換する必要があり、多大な時間、労力、予算 を必要とします。しかしながら現在の固定間接冷却 方式のミュオン標的では放射線損傷のために半年に 一度交換する必要があると計算されています。その ため黒鉛の放射線損傷を分散させるために回転標的 方式への移行を計画しています。平成23年度に導入 を目指して回転標的試作機を製作し、耐久試験を実 施しているところです。

参考文献

- [1] "Present status of construction for the muon target in J-PARC", S. Makimura et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A:600 (2009) 146-149
- [2] S. Makimura, Y. Miyake, K. Nishiyama, and K. Nagamine, "Design of Muon Target at J-PARC", Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan 2003 (2003)p.22-24.
- [3] H. Matsuo, graphite1991 [No.150] 290-302
- [4] "Muon Production target in J-PARC", S.Makimura, et al., Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting Meeting and the 30th Linear Accelerator Meeting Meeting Meeting Meeting Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu Japan (2005) p.173-175
- [5] S. Makimura et al., "The present status of R&D for the muon target at J-PARC: The development of silver -brazing method for graphite", Journal of Nuclear Materials 377 (2008) 28-3 [6] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, Development of
- General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code, J. Nucl. Sci. Technol. 39 (2002) 1142

水素炉を用いた金属接合技術の開発

工藤 昇 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 機械工学センター 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEK 内の水素炉を用いて、常伝導 X バンドリニア コライダー用、加速管の製作技術の確立を目標に行 ってきた。この加速管製作には、拡散接合と金ロウ でのロウ付けが重要な技術である。KEK で確立した、 技術を基礎に民間大型炉で3本の実加速管を製作し、 また KEK でも小型の加速管や多くの真空機器等を製 作したので、これらを基に開発した技術を報告する。

1. はじめに

1990年に加速器研究施設で購入した水素炉を、 2000年9月に放射線裏の洗浄棟からD5電源等に移 設し、11月末までに運転環境を整え試運転を行った。



(写真 1)

加速管製作に当 たっては、加速管セ ル接合のための拡 散接合と、カプラー 等付随部品接合に 必要が認知し付け 技術が関与し始めた 2000年には、これら の接合に関して、国 いて KEK とメーカー

との共同研究で、またそれを基の水素炉では SLAC (レトルト炉)で開発され実現していた。

このような背景を踏まえ、KEK 自前の技術を得て 更に開発を積極的に進めるために、KEK の水素炉を 用いて、X バンド加速管製作を拡散接合と金ロウ接 合で実現するための技術開発に取り組むことにした。

2. X バンド加速管への要求

常伝導 X バンドリニアコライダー用の加速管製作 には、次の事項が要求されていた。

・機械加工

-µm級の超精密加工セルの機械精度維持

-安価な量産

・加速管の製作組立工程
 -拡散接合+金ロウでの接合

-高真空(10⁻⁷Pa 台)

・高電界特性の改善

-高温水素による還元作用で表面浄化 -KEK 内で開発し、今後の技術的基盤を確保

加速管の主部品であるセル加工については、2000 年の時点ですでに機械工学センターで単結晶のダイ ヤモンドバイトよる無酸素銅の超精密加工を用いて 確立していた。

一方、加速管の組立については、KEK の指導の下 に国内のメーカーが、超精密加工したセルを用いて 真空炉で行っていたが、まだ KEK 内で、また水素炉 を用いては試みていなかった。すでに述べたように、 この水素炉での拡散接合とロウ付けを通して組立て る技術に踏み込む重要性を認識しており、本論文で 述べる技術開発につながったものである。

3. 加速管の製作工程

製作目標とした 60cm 加速管の主部品。部品数は以 下の通りである。(図 1)



【図-1 60cm 加速管 (KX01)】

- 空洞部(セル53枚) 拡散接合
- ② カプラー(部品数9) IN, OUT ロウ付け
- ③ 水冷管(部品数5)4本 ロウ付け
- ④ チューニングドン (108本) ロウ付け
- 部品の組立て及び製作工程は、
- 空洞部

超精密加工した 53 枚のセルは、機械工学センターに 構築したケミカルエッチングの施設で表面処理を行 った後に、クリーンな場所で組み立てる。(写真 2) その後、炉に移動し拡散接合を行う。





【写真 3 カプラー】

2 カプラー部
 ロウ材 Au25-Cu75
 (1030℃) で 2 段階
 ロウ付けを行う。
 (中間で機械加工
 を行う。)
 (写真 3)

 水冷管 Au25-Cu75で2回 のロウ付けを行う。 (写真 4)

【写真 4 水冷管】



④ チューニング ビン (写真 5)
 空洞の周波数調整のピン



①+2+3+④ (写真 6)
 ①23は、拡散接合及びロウ付け後、リークテストを行った後、各セルに④を2本セットしてAu35-Cu65(1010℃)
 で最終ロウ付けを行う。

2003 年には KEK の技術を移転し、東芝電子管デバ イス(株)で 60cm 加速管 1 号機を製作した。(写真 7)



【写真 7 60cm 加速管 (KX01)】

4. 拡散接合条件

拡散接合に関連する重要な要素は、 [接合前の条件]

- ・セルの加工精度及び平面度
- ・接合前の表面処理(ケミカル・エッチング) [炉での接合条件]
- ・最高温度までの時間(昇温速度)
- ・最高温度及び保持時間
- ・荷重 (面圧)
- が上げられる。

接合前の条件、特に平面度、これは1µm以下を達 成していないと、その後の条件をすべてクリアして もXバンド加速管の要求する拡散接合はでない。先 に述べたが、これはKEK 機械工学センターですでに 達成されていた。接合前の表面処理については、機 械工学センター内に処理設備を設置し、SLAC で確立 していたダイヤモンド加工品に対するケミカル・エ ッチング処方箋に基づいて対応することができた。 拡散接合を行うための温度に関する運転条件では、 水素炉(SLAC)、真空炉で各々図2のように行われて いた。最高温度までの昇温速度は両者とも約3時間 で同じであるが、最高温度および保持時間は異なっ ている。最高温度を高くすると保持時間が短くなっ ている。



[SLAC 水素炉] 昇温 1020℃ま で3時間、 1020℃で1時 間保持、冷却は ゆっくり [KEK 真空炉] 昇温 900℃まで 3時間、900℃ で2時間保持、 冷却は自然冷 却

【図 2 拡散接合の温度推移】

・荷重(面圧)については、両者 4psi 以上。

【写真 6 最終ロウ付け】

5. 加速管製作

KEK の水素炉での加速管製作第1号は2002年の20cm管(T20VG5)である。(写真8)



【写真 8 20cm 加速管(T20VG5)】 セルの加工は機械工学センターが行った。拡散接 合(写真 9)は、数枚のセルでの接合テストの延長



をにっ昇持じSLACで真接枚ののて、 ・速間素のつは後枚のでした。 をは炉接たののです。 とは炉をためのの のの合い。

で単に荷重

【写真9 拡散接合セット】



【写真 10 拡散接合されたセル】 カプラー等の部品も加速管の製作工程を確立する 基盤となった。

・60cm 加速管の製作

KEKの水素炉は有効高さが 60cm しかなく、

60 cm加速管の製作は不可能なので、東芝の水素炉 で行うことにした。東芝では拡散接合で加速管を製 作した経験がなく、接合ジグの設計・製作は KEK が 行った。(写真 11)



【写真 11 拡散接合ジグ(荷重 15Kg)】 また、接合温度条件について、最高温度 1020℃ で1時間保持するのは、東芝の製造に用いる通常運 転に、支障をきたす可能性があるとのことで、条件 を緩和すべく可能なパラメータを探すべく両者でテ ストを行った。(テストの一部を表 1 に示す)

最高温度 980℃、保持時間 90 分(図 3)、荷重 15Kg で可能との結論を得た。また、運転方法に関しても 昇温前の水素ガスの導入時間、冷却時のヒーターの 移動に関して KEK の考えで変更した。



【写真13 拡散接合】【写真12 拡散接合の断面】

拡散接合テストの断面(写真12)で確実に接合されていることを確認した。写真13は60cm加速管の拡散接合のセットである。

KX01 (写真 7)の後に、KX02 (写真 14)、KX03 (写 真 15)の製作も行った。



【写真14 KX02】



【写真 15 KX03】

6. KEK の水素炉での接合

6.1 拡散接合

2004年、リニアコライダー計画は超伝導技術に決 定したことに関連して、それまでのXバンド試験設 備は、アッセンブルホールのXTFから入射器棟加速 管組立て室Nextefに移行した。その際に必要になっ た多くの導波管等パーツの製作を水素炉で行った。 2006年には、9.4GHz、1MVの加速管(写真16)の 製作依頼が外部からあった。2002年の20cm加速管 (T20VG5)以来の加速管製作であり、また構造の



【写真 16 9.4GHz1MV の加速管】

違い長さの違い等があり、KEK 水素炉で拡散接合ジ グ(写真11)を使っての運転条件出しを行った。

判定は、リークテスト、その後ワイヤーカットで 切断し断面検査を行なって最適条件を決定した。



テストでは、荷重、最高 温度までの昇温速度は固 定して、最高温度及び最高 温度での保持時間を変更 して行った。どの条件でも 真空リークはなかったが、 切断すると外側数 mm に、 数十 μ mの隙間が出来る場 合が多かった。

【写真17 改良接合ジグ】

テスト中、荷重周りの温度測定を行って、荷重自体 が接合に必要な温度均一性を悪化させていると判断 した。そこで荷重を台座の下(写真 17)にすること にし、問題の隙間をなくすことが出来た。(写真 18)



【写真18 拡散接合したセルの断面】

これらテストの結果水素炉での拡散接合条件は

・昇温速度 平均約6℃/min

(物温の最高温度到達まで 3.0~3.5H)

- ・物温の最高温度 約 980℃
- •保持時間 約110分
- 荷重 約 10Kg (面圧はセル径で変わる)

現在もこの条件で、高電界試験加速管(写真 19)の 製作も行なっている。



6.2 ロウ付け

拡散接合と連携して加速器の製作に必須の技術、 特に日本メーカーでは一般的でない水素炉でのロウ 付けを確立した。特に、

・金ロウを用いた接合

・銅及びステンレスのロウ付け

の技術である。ロウ付けでは、SUS ワイヤー&ロウ 材固定セメント使用でセットを簡素化することを心



がけている。一例として (写真 20)、9.4GHz、1MV の加速管の水冷管のロウ 付けでは、水冷管を SUS ワ イヤーで縛り、本体に密着 させ、ワイヤーロウを本体 と水冷管の間にセメント で固定する。(粉末

【写真 20 水冷管】

のロウ材の場合も同じ。)

運転条件に関しては、KEK の水素炉を 500 回以上 運転した経験より、この簡易型水素炉の運転方法と して以下のことを導き出した。

- ロウ付けする物の重量、長さによってヒーター の昇温速度は 6~13℃/min. で行う
- とーターの最高温度はロウ材の溶解温度より 45~50℃高くセットする
- 最高温度での保持時間は重量によって 10~30 分とする(予め、保持時間は短めにセットし、 物温がロウ材溶解温度より 10℃高い温度にな るまで保持する(Hold-半手動))
- 冷却時、ヒーターはロウ材の固相温度より 30℃ 低い温度まで 10℃/min. で下降しその後、ヒー ターの最高下降速度で下げ、電源を切る

最後にこの9年間で加速管以外のロウ付け作業で、 製作した代表的なものを2作報告する。



【写真 21 RF-GUN】

(写真 21) GUN の製作は、2002 ~2009 年まで 8 台製 作した。 部品数 40 使用ロウ材-運転回数 Au25-Cu75(1030)-2 回 Au35-Cu65(1010)-1 回 Au50-Cu50(970)-2 回

①S-band RF-GUN

研究協力で、大学へ の製作品が多数ある。 ② X-band ダミーロード(写真 22)
 2 種類 2 本製作、全長 630mm、部品数 76
 銅ロウ(1083)-1 回、Au25-Cu75(1030)-2 回
 Au35-Cu65(1010)-1 回、Au50-Cu50(970)-1 回



【写真 22 X-band ダミーロード】

7.まとめ

水素炉に携わった、第一目標の加速管の製作を迷 走しながらも無事達成出来たことを嬉しく思います。 この技術を直接展開していくべきXバンドリニアコ ライダーが別技術を選択したことは残念ですが、こ れまで開発してきた技術は加速器に必須である高周 波加速の基盤を形成するものと理解しています。今 後更に高電界の加速器が必要になることもあり、KEK はそれを展開すべきラボです。それに向けた基礎研 究を遂行するための基盤技術に貢献できたことは私 にとっても意義深いことです。

今後も、この経験を基礎に接合技術の確立に努力 し、依頼者の期待に応えられる製品製作、技術開発 に努力します。また、この技術の継承にも努めます。

8. 謝辞

KEK 技術賞に推薦して頂いた加速器研究施設・入 射器研究系の肥後寿泰氏に感謝致します。また、X バンド開発に携わっていた加速器研究施設・入射器 研究系、ATF グループ及び共通基盤研究施設・機械 工学センターの多くの方々に感謝致します。

参考文献

- [1]Xバンドロード: "Stainless-steel X-band High Power RF Load with Low Surface Field", A. Lounine, T. Higo, N. Kudo and K. Watanabe, KEK Report 2006-2, July 2006.
- [2]Xバンド加速管の製作:「Xバンド高電界加速の研究」、 肥後、工藤、他共著、TP095,第5回加速器学会、東広 島、2008年
- [3]Xバンド試験設備Nextefに必要な導波管類の製作:
 「100MW級Xバンド加速管試験施設Nextefについて」、
 松本、工藤、他、T015,同上文献
- [4]Xバンド試験狭導波管の製作:「狭導波管を用いた高電 界放電特性」、横山、工藤、他、TP071,同上文献

- [5]SバンドRF-Gun:「Cs-Teフォトカソード S バンド RF-Gunの開発」村田、工藤、他、TP122,同上文献
- [6]Cバンド導波管ロウ付け: "Status of C-band Accelerator Module in the KEKB" THPMN027, PAC07、USA, 2007.
- [7] 工藤昇 ロウ付け技術開発の現状-第1回メカ・ワーク(2001)
- [8] 工藤昇、東保男、人見宣輝
 ロウ付け技術開発の現状(Ⅱ)
 (20cm 加速管ダミーの製作結果・評価および今後の
 課題)-第2回メカ・ワーク(2002)
- [9] 工藤昇、東憲男、東保男、人見宣輝
 ロウ付け技術開発の現状(Ⅲ)(2003)
 (加速管「T20VG5」の製作)-第3回メカ・ワーク
- [11] 工藤昇、東憲男、東保男、肥後寿泰
 60cm 加速管の接合-第4回メカ・ワーク(2004)
 (ロウ付け技術開発の現状(IV))
- [12] 工藤 昇 水素炉でのロウ付け-第9回メカ・ワーク(2009)

T0 チョッパー制御・計測システムの開発

下ヶ橋秀典¹ 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 中性子科学研究系 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

パルス中性子源に設置された中性子分光器におい て、バックグラウンドノイズの原因となる高エネル ギー中性子が分光器内に入射しないようにするデバ イスである T0 チョッパーの開発が求められた。それ は、低バックグラウンドの中性子散乱実験を実現し、 実験データの質を向上させ、今まで検出が困難であ った高エネルギーの素励起を検出できるようになる などといった、中性子科学の質的変革をもたらすも のである。日本原子力研究開発機構との協力におい て J-PARC の建設が進行しているが、物質・生命科学 実験施設(NML)の中性子分光器開発において、T0 チョッパーの開発は KEK の分担により開始された。 T0 チョッパーの開発は中性子科学研究施設と機械工 学センターの共同開発研究により、2002年度から開 始され、その中で、制御・計測システムの開発を担 当してきた。目標のエネルギー領域の中性子の効率 的利用を実現するためには、120kgの重量物を、100Hz で回転させ、かつ回転位相を±5µsの精度で中性子 の発生(すなわち加速器周期)に同期させなければ ならない。また、T0 チョッパーは中性子実験施設の 基幹となるデバイスであり、十分長期間の連続運転 が安定かつ安全になされなければならない。このよ うな要請に応えられるか否かは、T0 チョッパーの制 御・計測システムの質に強く依存するものである。 この研究開発において、十分実用的にも満足できる 制御・計測システムの構築に成功し、現在 NML ビー ムラインに設置され、順調に稼働している。これに より当初の開発目標を達成した。

1. はじめに

T0 チョッパーとは、パルス中性子源に設置された 中性子分光器において、高エネルギー中性子に対す る遮蔽材である鋼材重量物をパルス中性子の発生に 同期させて回転させることにより、中性子発生時刻 に中性子ビームラインを遮断し、バックグラウンド ノイズの原因となる高エネルギー中性子(バースト) が分光器内へ入射するのを妨げる装置であり、目的 とするエネルギー範囲の中性子群を明瞭にするデバ イスである。中性子発生と同時刻にビーム孔を鉄材 (インコネル)等で塞ぎ、ビーム発生時の強烈な高 エネルギーの中性子を遮蔽し、逆に発生時以外はビ ーム孔を開き中性子ビームを通過させなければなら ない。中性子ビームを正確な時間ごとに遮断するた めには、遮蔽体をモータ等で回転させビームとの同 期運転制御を行う必要がある(図1参照)。さらに、 高いエネルギーの中性子を利用するため、遮蔽体開 閉速度(回転速度)の高速化が要求されるものである。



図1 T0チョッパーの役割

2. 装置本体と仕様

2.1 装置本体

写真1にT0チョッパー装置本体を示す。下部に淡 色の鉄製架台があり、その上に、ステンレス製の真 空容器(奥)、駆動用モータ(手前)が載せられて いる。真空容器上部にある丸い窓は、中性子ビーム 孔が接続される部分である。本装置はテスト機のた めアクリル製の窓が付けられ、肉眼で中の状態が確 認出来る様になっている。真空容器の中にはインコ ネル製の遮蔽回転体 (ロータ) が納められており (写 真2参照)、1Pa 程度の真空中で回転する。モータか らブレードへの駆動の伝達にはタイミングベルト、 カップリングが用いられ、真空槽内へは磁性流体を 用いた磁気シールユニットにより繋がれている。写 真では確認できないが、装置後方にも磁気シールユ ニットがあり、ブレードからの回転情報を得るため のセンサが取り付けられている。なお、後方の磁気 シールユニットはモータ側に比ベトルクがかからな い事から、小サイズのユニットを用いている。

¹ E-mail: hidenori.sagehasi@kek.jp



写真1 T0 チョッパー装置本体(試作機)



写真2 装置真空槽内部(遮蔽体(ブレード))

2.2 仕様

表1にT0チョッパーの主な仕様を示す。表中「最 大エネルギー」とは、このT0チョッパーで利用可能 な中性子の最大のエネルギー値で、高いほど有効で ある。この値は線源からT0チョッパーまでの距離と ビーム孔開閉速度によって求められる。今回、この 値を2eVとして装置の仕様が決定され、ロータの必 要回転数が100Hz(6000rpm)となった。次に、表中 「マスタークロック周波数」とは、中性子発生のタ イミング、加速器のタイミング、その他の全ての動 作がこのクロックに同期して運転され、全てのタイ ミングの基となるパルスの周波数である。当然本装 置もこのマスタークロックのタイミングに同期させ る必要がある。

2.3 モータの選定

ロータ駆動・制御用モータとして AC サーボモー タを選定した。選定理由として、容易に高精度の制 御が入手可能であること、大容量のモータが存在す ること、汎用品が存在すること、パルス列入力が可 能であることが挙げられる。重さ120kg、慣性モーメ ント 4.7kg m²の遮蔽体を制御しながら高速回転 (100Hz) させるため、50Hz で連続運転可能な市販 のAC サーボモータで最大級出力のものを選定した。 モータ回転数の50Hzからロータ回転数の100Hzには タイミングベルトのプーリーの比により増速させ、 ロータにおいて100Hz で回転するようにした。

2.4 モータ駆動方法

選定した AC サーボモータはパルス列入力によ り回転を制御することが出来る。パルス列入力と は回転指令としてパルス列を与え、パルスの数や 頻度によりモータを制御するものである。パルス の数はサーボモータの回転した角度に相当し、パ ルスの頻度はサーボモータの回転速度に相当する。 マスタークロック(12MHz)に同期したパルス列 を生成し、サーボアンプのパルス列入力に速度指 令として与えることによって、中性子発生時刻に 同期したロータの回転位相制御を実現した。また、 パルス列を増減させることにより、ロータの同期 角度の位置を任意に変更することを可能にした。 開発期間において J-PARC 施設は稼動していなか ったため、マスタークロック、T0パルス共に、市 販のシンセサイザー発振器を用い信号を模して開 発を行った。

項目	仕様
最大エネルギー	2eV(線源から 8.5m 位置に設置 @100Hz)
ビームサイズ	80mm×80mm
ブレードサイズ	82mm×82mm×300mm (300mm : length)
回転半径	300mm
最大回転数	100Hz (6,000rpm)
要求位相制御精度	±5μs (ビームサイズ±1mm)
ブレード材質	Inconel X750 (鍛造、一体加工)
重量・慣性モーメント	120Kg • 4.7kg m ²
真空容器真空度	1Pa 程度
モータ	AC サーボ,10kW, 3000rpmベルト増速
マスタークロック	12MHz
中性子発生周期	25Hz
目標連続運転時間	1,000 時間

表1 T0 チョッパー仕様

3. T0 チョッパーの制御開発要件

T0 チョッパーの制御開発要件として、以下の項目 が挙げられる。これらは段階を踏みながら機械要素 の開発・試験と共に進められた。

- ① 100Hz±5µs以内の回転精度の確立と確認
- ② ロータ位相位置のシフト動作
- ③ ロータ回転速度の加減速制御
- ④ 外部クロック (マスタークロック) との同期
- 5 ロータの位相制御
- ⑥ 動作を検証するための計測システム
- ⑦ 長時間無人運転のための運転状態監視計測系の開発とリアルタイム記録
- ⑧ 開発を進める上で安全に実験を行うためのインターロック等の整備
- ⑨ プロトタイプの製作(J-PARC向けの実用機)

4. 制御システム

4.1 制御システム概要

図2に実験用制御盤システム概要(実験用最終形) を示す。ブレードを回転させるモータとモータアン プは既製品を利用した。制御ユニットはアンプに回 転指令を与えるため、回転パルス用のパルス列テー ブルの作成や切替え、加減速制御、マスタークロッ ク同期、位相位置調整、ドリフト補正等を行い、ま た、ロガー計測用の回転揺らぎ(同期ぶれ)信号の変換 を行っている。Data Logger は安全インターロックと 実験データの収集を行っている。開発は先にも述べ たが段階を踏んで行われたため、開発当初は本体と モータ&アンプ、最低限の安全装置、パルス列生成 回路(後述)、オシロスコープ程度の装備で開発を 行っていた。

実験用制御盤(実験用最終形)の様子を写真3に 示す。



写真3 実験用制御盤(実験用最終形)



4.2 制御ユニット概要

図3に制御ユニットの概略図を示す。制御ユニッ トは大きく分けて3つのブロックに分けられる。 Acceleration Block はチョッパーの加減速制御とマス タークロックのへの同期を行う部分である。Pulse Generator Block はモータアンプに与えるパルス列テ ーブルを生成し、指令によりテーブルを切替える部 分である。Drift Phase Block は中性子発生タイミング 信号との位相位置の調整、ドリフト補正制御を行う 部分である。また、Time Analyzer と Time-Voltage Converter は開発実験時の回転揺らぎ(同期ぶれ)の計 測及び信号の変換を行っている。

5. 加減速マスタークロック同期回路 (ACCELERATION BLOCK)

3. 開発要件の③、④に必要な技術開発である。 ロータの慣性モーメントが大きいため、所定の回 転数(ロータ 100Hz)になるまでに数十分(現在 50min)を要する。パルス列生成回路にいきなりマス タークロックを入力したのではモータの過負荷とな り運転不可能である。この回路では加減速運転時に ダイレクトデジタルシンセサイザ(DDS)の出力を パルス列生成回路に入力し、一定加減速度で回転数 を上下させ、所定の回転数に達したらマスタークロ ックによる同期回転に切り替える回路である。DDS →マスタークロック切換え時には周波数の合わせ込 みを行っており、切り替え時のショックを無くして いる。DDS は市販のキット基板を利用し、コントロ ールにはワンチップ CPUを使用している。また、本 回路はマスタークロックがトラブル等により切断さ



写真5 加減速回路基板



図4 加減速マスタークロック同期回路動作図

れた場合、出力を DDS に切り換える機能も持っている。図4に動作図、写真5に回路基板写真を示す。

6. パルス列生成回路 (PULSE GENERATOR BLOCK)

3.開発要件の①、②に必要な技術開発である。 本装置ではパルス列入力により AC サーボモータ の回転を制御している。先にも述べたが、パルスの 数や頻度によりモータを制御するものであり、マス タークロックに同期したパルス列を生成し、速度指 令としてパルスを与えることによって、中性子発生 時刻に同期したロータの回転位相制御を実現してい る。パルス列テーブルを同期運転用、微調整位相シ フト(+・-)用、中速・高速位相シフト用の5種 類設け、ドリフト位相設定回路の指令により適宜切 り替えて使用される。パルス列データは運転開始前 にワンチップ CPUにより算出され、SRAMに格納さ れる。SRAM のアドレスがサーボアンプへのパルス 1つに対応しており、そのデータはマスタークロッ





図8 位相位置移動測定結果

クの数に対応している。パルス列を8192パルス与え るとモータは1回転するように設定し、パルス列デ ータもそれを元に算出される。図5~8にパルス列 テーブル例と位相位置移動の測定結果を示す。図5 は同期運転時のパルス列テーブルで、図6は12MHz の1パルス増やしたパルス列テーブルである。図7 はその時の回転揺らぎ測定結果である。図8は5秒 間+1パルス列テーブルに切替えた時の回転揺らぎ結 果である。位相位置が移動しているのが確認出来る。 写真6に回路基板写真を示す。



写真6 パルス列生成回路基板

7. ドリフト位相設定回路 (DRIFT PHASE BLOCK)

3. 開発要件の⑤に必要な技術開発である。 マスタークロックにより同期回転しているロータ を任意の位置に移動(移相)可能とするものである。 移相方法はパルス列生成回路のパルス列テーブルを 切換えて行う。本回路ではT0パルスとロータからの 回転パルスを比較し、ロータ位置が設定値になるよ うにパルステーブルを切換えて移相させ、ロータを 制御するものである。また、今回使用したサーボア ンプは位相位置を補償していない。モータの負荷、 温度等によって位相位置がドリフトしてしまう。そ こで、回転揺らぎを測定してその移動平均値(現在 10sec)を算出し、ドリフトによりずれた位相位置を 補正している。移動平均値データのスタックには SRAM を使用しコントロールにはワンチップ CPU を 使用した。図9に移動平均の模式図を示す。また、 写真7に回路基板を示す。図10、11にドリフト補正 機能をなし(OFF)、あり(ON)にした場合の回転揺らぎ (図中濃色線)時系列データ(4時間半)を示す。





ドリフト補正なし 図10



図11 ドリフト補正あり

図10、11においてグラフの上部の線は回転揺ら ぎで、下部の線はモータ電流である。ドリフト補正 なしの場合、時間経過とともに 6 µ s ほど位相がずれ てしまうのに対し、同じ条件で運転したドリフト補 正ありの場合、ほとんど位相のずれは見られないこ とが分かる。これによりドリフト補正回路の効果が 確認出来る。



ドリフト位相設定回路基板 写真7

8. 動作検証関係の回路開発

3. 開発要件の①~⑤及び⑥に必要な技術開発で ある。

同期回転の検証用として各種カウンタを製作した。 マスタークロック 12MHz を入力として、カウント値 を変更可能なカウンタで 100Hz を作り、T0 パルスの 代わりとした。その TO パルスとロータからの回転パ ルスをタイムアナライザ、オシロスコープで観測す ることにより、動作の検証が行われた。さらに、長 時間の回転揺らぎの全データを収集するために、測 定データを 232C シリアル変換し、パソコン上の LabVIEW に取込ませ、ヒストグラムを表示、データ を保存させるシステムを開発した。これはワンチッ プ CPU を用いて、計測、データ変換・転送を行うも のである。回路基板を写真8に示し、LabNIEWの測 定結果画面例を図12に示す。



写真8 Time Analyzer 回路基板



図12 Time Analyzer による測定例

9. 長時間無人運転試験のための開発

3. 開発要件の⑦、⑧に必要な技術開発である。 開発試験用計測システムでは長期的にデータ収 集を行うために、データロガーを用いている。デー タロガーに回転揺らぎを記録するため、回転揺らぎ の測定データをアナログ電圧に変換しロガーに取込 を行っている。その変換回路(回転揺らぎ用時間-電 圧変換回路)の開発を行った。ロガーには揺らぎデ ータの他に本体のベアリング等の温度、冷却水流量、 真空度、振動(加速度)、モータ電流、回転数のデ ータを取込ませ、記録・保存すると同時に全ての要 素に対してリミッタを設定し、安全監視のインター ロックを組んでいる。さらに、画像データとしてデ ジカム撮影した映像を HDD レコーダに記録し不具 合時の確認用として利用している。開発現場の写真 を写真9に示す。



開発現場写真 写真9

10. 実機用 T0 チョッパー制御盤の試作

3.開発要件の⑨に必要な技術開発である。 各制御要素(回路)の開発、動作検証試験、長時 間運転試験により、T0チョッパー完成への目処が付 いた時点で、実機用制御盤の試作を行った。運転指 令、状態表示、パラメータ設定をプログラマブルコ ントローラ(PLC)とタッチパネルで行う様にし、各 制御回路を基板化し、制御ユニットとしてまとめた。 その他、モータアンプ、モータ用回生抵抗、電源操 作部、安全監視インターロック等を含め、全てを19 インチラック1台にまとめ、T0チョッパー制御盤と して完成させた。写真10に実機用 T0 制御盤の写真 を示す。



写真10 実機用制御盤

11. 回転精度の検証

図13に T0 チョッパー1号機の回転精度測定結 果を示す。図はドリフト補正機能 ON 時と OFF 時の 設定位相位置との差(回転揺らぎ)をヒストグラム で比較した結果を示す。ON 時の測定時間は 96 時間 で、OFF 時の測定時間は 7 時間である。ON 時の回転 揺らぎの半値幅は± 0.5μ s であった。ただし、± 0.5μ s は装置本体の機械的な安定が保たれている状態 の時の結果である。以上により回転精度が目標値を 達成していることが確認された。

12. 中性子ビームを用いた効果の検証

J-PARC、NML 中性子ビームラインに T0 チョッパ ーを設置し、実際の中性子ビームを用いて中性子飛 行時間スペクトルを測定した結果、中性子ビームの 特定時間領域で遮蔽が行われていることが確認され た。



図13 回転精度測定結果

13. まとめ

回転制御について、100Hz(6,000 回転/分)において 12MHzのマスタークロックに同期させ±5µsの位相 制御を達成し、任意の位相位置に合わせることを実 現した。また、動作検証方法を開発し同期運転の揺 らぎを観測可能とした。長期連続試験運転では、 100Hz(6,000 回転/分)において累積運転時間 4,648 時 間(連続運転時間 1,551 時間を含む)を達成し、試験 時の運転データの記録を行い装置本体の解析に役立 てた。その際、安全インターロックを構築し実験(試 験)の安全確保を図った。実験用制御盤により本体 開発、長期連続運転試験、制御動作等の確認がなさ れた後、実機用制御盤の開発を行い、完成に至った。

2009 年度 J-PARC の MLF 実験施設において、1 台 が稼働中であり、他に2 台製作をしてきた。さらに 1 台の製作が開始された。

今回のTOチョッパー制御・計測システムの開発に 当たり、中性子科学研究系の伊藤晋一准教授、機械 工学センターの上野健治教授、大久保隆治技師、舟 橋義聖先任技師に深く感謝致します。また、実機用 制御盤試作に当たり、有限会社テクノエーピーの皆 様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 下ヶ橋秀典. "技術交流会報告集", Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK, KEK Proceedings 2009-11 December 2009 A/D, T0 チョッパーの開発(制御) p38-42
- [2] S.ITOH, K.UENO, R.OHKUBO, H.SAGEHASHI, Y.FUNAHASHI, S.KOIKE, M.KAWAI, M.ISHIHAMA and N.HITOMI, "KENS REPORT XV 2003-2006", Progress Report 2006-4 M, Design for 100Hz background suppression chopper p371-372
- suppression chopper p371-372 [3] 下ヶ橋秀典,大久保隆治,伊藤晋一,上野健治,舟橋 義聖."分子科学研究所技術研究会報告" No.17 2006 年3月,T0チョッパーの開発(制御) p252-255
- S.ITOH, K.UENO, R.OHKUBO, H.SAGEHASHI, Y.FUNAHASHI, N.SATO and M.KAWAI, "ICANS-XVII" April 25-29 2005, Development of 100Hz T0 chopper p1038-1041

EPICS on F3RP61の開発と応用

小田切淳一

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第四研究系 KEKB 制御グループ 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) をベースにした加速器制御システムのため の Input / Output Controller (IOC) として PLC を利用 する技術を開発した。同技術は Linux を OS として採 用した横河電機社製 FA-M3 PLC 用の CPU モジュー ル (F3RP61) と I/O モジュールを利用する。EPICS のコア・プログラムを F3RP61 の上で直接実行するこ とにより、VME/VxWorks ベースの IOC の下に従来 型の PLC を配置して両者をイーサネット越しに通信 させる必要はなくなり、IOC と PLC の機能を F3RP61/Linux ベースの IOC に統合することができた。 その結果、制御ソフトウェアの開発時間が短縮され、 維持費用が軽減された。この技術は、現在稼働中の 加速器の制御システムにおいて実用に供され、 F3RP61 と、その上で動作する EPICS (EPICS on F3RP61)の安定性が実証されている。本稿では EPICS on F3RP61の開発と応用、および今後の展開について 述べる。

1. はじめに

近年、加速器制御システムにおいてフロントエンド 制御のためのコントローラとして PLC が多用される 傾向にある。EPICS に基づく加速器制御システムの 場合、PLC は IOC と呼ばれるフロントエンド計算機 の下に配置され、直接、被制御機器と向き合うこと になる(図1(A))。上位制御系からの設定、実行コ マンド等は IOC を経由して PLC に送られ、また、各



図1:従来のPLCとIOCの接続方法(A)と組込み EPICSの採用によるPLC自体のIOC化(B)

種の設定値、モニタ値、被制御機器の状態情報など はPLCから IOC を経由して上位制御系に届けられる。 このように、EPICS ベースの制御システムに PLC が 導入された結果として、本来、被制御機器に向き合 うコントローラであるべき IOC は単なる仲介役に近 い存在となった。また、IOC の機能の一部が PLC に 移転したことにより、フロントエンドの制御ロジッ クが複数のコントローラ上に分散されるようになっ た。このことは 3 節に詳述するように制御ソフトウ ェアの開発時間と開発コストの上昇を招く。

次節では、まず EPICS の特徴と基本的概念につい て簡潔に述べ、3 節と 4 節において、組込み EPICS 技術によるフロントエンド制御の簡素化とソフトウ ェア開発の効率化について述べる。5 節では実際の加 速器への応用について述べ、6 節で同技術に関わる今 後の展開について触れる。最後の 7 節において本稿 のまとめを行う。

2. EPICS とは

EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) とは、加速器制御システムを構築するための ソフトウェア部品 (ツールキット)の集まりであ る^[1]。1980 年代にロス・アラモス国立研究所とアル ゴンヌ国立研究所が中心となって開発され、現在で は数多くの加速器および大型物理実験施設の制御に 採用されている。EPICS の基本パッケージは、EPICS

Open Source License の下で、無償でダウンロードし て利用できる。また、メーリング・リストなどを通 じて EPICS コミュニティからの voluntary なサポート を得ることもできる。

EPICS はネットワークで結合された分散型のシス テムを前提とする。ローカル制御室に設置され、直 接、機器と向き合うフロントエンド計算機は IOC (Input / Output Controller) と呼ばれ、この上で制御ロ ジックを構築するための汎用的なソフトウェア部品 が提供されている(図2)^[2]。

一方、オペレータとインタフェースする GUI など のソフトウェアも豊富にそろっている^[3]。こちらは中 央制御室に置かれる Operator Interface (OPI) と呼ば れるサーバ上で実行される (図3)。EPICS について 特筆すべき点は、IOC と OPI の間の通信を担う Channel Access と呼ばれるライブラリが標準配布パ ッケージの一部として提供されることである^[4]。この ため、IOC と OPI でのデータのやり取りは、チャネ ル(データの流れ)の名称を両者で一致させるだけ で実現できる。Channel Access は Unix のソケットに 近いオーバヘッドの少ない高速な通信を行うが、IOC の動的な追加への対応や TCP 接続が切れた場合の再 接続などの基本機能がしっかりと実装されている。



図2: IOC として利用される VME 計算機の例



図3:OPIの例(KEKB 中央制御室)

3. 組込み EPICS の必要性

3.1 プログラム開発環境の学習コスト

高機能化が著しい近時の PLC の実態は、むしろ IOC と同等な機能を有するフロントエンド計算機に 近い。高機能化が進めば、当然、それに応じてアプ リケーション開発環境に習熟するための学習コスト も増す。EPICS については、しばしば、その学習コ ストの高さが欠点として指摘されているが、言葉を 換えれば、それだけ EPICS が高い機能性を持つこと の証左であるとも言える。いずれにせよ、高機能な 二種の計算機(IOC と PLC)を併用することは、学 習コストの増加を招き、制御ソフトウェアの開発コ ストと維持コストの増大を招くため、後述する人的 保護のインタロックなどの特別な場合を除いて可能 な限り避けるべきであろう。

3.2 分散したロジックのデバッグの難しさ

IOC と PLC の併用がもたらすもう一つの弊害とし て制御ソフトウェアの開発時、運用時のデバッグの 難しさがある。IOC のプログラミングと PLC のプロ グラミングは、別なプログラマが担当する場合が多 い。これは両者のプログラミングのスタイル、開発 環境が極めて異質であることに起因する。このよう な状況において両者の結合試験を行う場合、双方が 相手方の理解を欠いたままで不具合の調査に当たる ことになり、些細な問題であってもデバッグを完了 するまでに時間が掛かることが多く、開発時、運用 時のコスト増加を招く。

3.3 EPICS ドライバの開発コスト

従来のように IOC と PLC をイーサネットにより接 続する場合、両者の通信を司るドライバ・プログラ ムが必要となる。商用の制御システムであれば、 のようなドライバ・プログラムはベンダーにより供 給されるため、ユーザがドライバ・プログラムを実 装する必要はない。しかし、ユーザ・コミュニティ による開発を前提とする EPICS の場合、世界的にポ ピュラーなデバイスを除けば、新たなデバイスをサ ポートするためには、ドライバ・プログラム(デバ イス/ドライバ・サポート)を自ら実装する必要があ る。イーサネット上の TCP/IP 通信は1ミリ秒程度の 時間を要する遅い I/O 処理であることにより、デバイ ス/ドライバ・サポートはコールバックを使用する非 同期型の複雑なものになる^[5]。タイムアウト処理と受 信処理に競合が生じた場合の取り扱い、さらに TCP を用いる場合はコネクションが切れた後での自動復 旧処理にも注意が必要である。これらの理由で、 TCP/IP 通信をサポートするデバイス/ドライバ・サポ ートの実装はコストの掛かる作業になる。

3.5 組込み EPICS による問題の解決

以上に述べた問題は全て IOC と PLC という二種の I/O コントローラを用いることによりフロントエン ド制御が二層化されたことに起因する。したがって、 PLC 自体を IOC とする、つまり、PLC の CPU モジュ ールの上で直接、EPICS の IOC プログラムを実行す ることができれば、これらの問題はすべて雲散霧消 する (図 1 (B))^[6]。IOC プログラムを実行する計算 機には OS が必要とされるが、近年の技術の進歩に より OS を搭載した PLC 用 CPU モジュールが市場で 調達可能になった。これらの CPU モジュールと既存 の豊富な PLC 用 I/O モジュールを組み合わせて新た なタイプの IOC を実現できる。PLC に EPICS を組み 込んだ IOC (EPICS on F3RP61)を採用すれば、ソフ トウェア開発の学習コストは基本的には EPICS だけ で済み、デバッグも EPICS のアプリケーションのみ で済む。さらに次節で述べるように EPICS デバイス/ ドライバ・サポートの開発も大幅に簡素化される。

4. EPICS ON F3RP61 の開発

4.1 LINUX のリアルタイム応答性

EPICS の開発当初には IOC の OS として商用のリ アルタイム OS である VxWorks が採用された。その 後、EPICS バージョン 3.14 からは、その他の複数の OS 上での実行が可能となった。近年では、リアルタ イム応答性の面で制御用途には不向きであるとされ てきた Linux が IOC の OS として使われるケースが 多くなってきた。それは以下の理由による。第一に、 高周波フィードバック、大電力ビームからの機器の 保護といった極めて速い応答を要求される制御には FPGA を用いることが主流になりつつあること。第二 に、近年、Linux のリアルタイム応答性の向上が著し いこと。これはカーネル2.6から、カーネルモードで 実行中のプロセスから処理を横取りする機能 (preemption) が備わったことによる。その結果、リ アルタイム応答性に関しては、FPGA がカバーする領 域と Linux でカバーできる領域の間のギャップが狭 まりつつある。

4.2 LINUX のメリット

加速器制御において Linux を採用することには、 以下のような大きな利点がある。工業プラントやコ ンシューマ向けの製品とは異なり、加速器は実験装 置という性格が強く、その生涯に亘り性能向上に向 けての機器の追加、構成の変更が継続的に行われる。 その結果、制御ソフトウェアについても永遠に製品 として完成することはなく、運転休止期間中、運転 中を問わず制御ソフトウェアの修正、機能追加が求 められる。言葉を換えれば、加速器制御のためのア プリケーション・ソフトウェアの「製品寿命」はか なり短い。このため、ソフトウェアの開発期間の短 縮は特に重要な意味を持つ。アプリケーション・プ ログラムがカーネルと一体化したモジュールとして 実行されるリアルタイム OS の場合、アプリケーショ ンの修正に伴ってカーネルからのリブートが必要に なるため、小まめな修正への対応には向かない。こ れに対してアプリケーションをユーザ・レベルのプ ロセスとして実装する Linux の場合、その起動と終 了は格段に速い。そこで、修正、コンパイル、実行、 結果の確認という一連のサイクルを小まめに繰り返 すことができる。また、カーネルのメモリ空間がユ ーザ・レベルのプログラムから保護されている Linux の場合、アプリケーションのバグによりシステム自 体がクラッシュすることもない。このようなアプリ

ケーション開発の容易さが、被制御機器の更新など に素早く対応する際の Linux の大きなメリットとな る。

4.3 PLC 用 LINUX 搭載 CPU モジュール

このような加速器制御分野からの要望に基づき、 横河電機株式会社によりLinuxをOSとして採用した FA-M3 用 CPU モジュール、F3RP61(図4)が開発 され、2008年9月に市場への製品供給が始まった^[7]。 この CPU モジュールを使用し、その上で直接 IOC プ ログラムを実行することにより、図1(B)に示した PLC 自体の IOC 化が可能となる^[8]。



Model Name: F3RP61

Linux Kernel 2.6.14.3 32bit 533MHz PowerPC 128MB RAM 64MB Flash ROM

図4:LinuxをOSとして搭載したFA-M3 PLC用CPU モジュール(F3RP61)

4.4 EPICS ドライバの実装

FA-M3 の I/O モジュールにアクセスするためのカ ーネル・レベルのドライバは Linux のカーネル・モ ジュールとして BSP に含まれる。このドライバが提 供する Application Program Interface (API) をラップ するだけで容易に EPICS のデバイス/ドライバ・サポ ートを実装することが可能である。実際、最も簡単 なデータ型のデバイス・サポートの場合には、その 実装に要する時間は高々、数時間程度であった。

4.5 EPICS SEQUENCER の利用

EPICS の標準配布には含まれていないが、シーケンス制御を行うための追加的なソフトウェア・モジュールとして EPICS Sequencer がある。EPICS Sequencer は State Notation Language (SNL) と呼ばれる独自の言語で記述される^[9]。その特徴は、その名が示すように state (状態) という概念を持つことにある。複数の状態を定義し、それらの間で特定のイベントを契機として遷移するプログラムを書くことになるが、このイベント待ちを簡明に記述する構文も用意されている。EPICS on F3RP61 では、EPICS

Sequencer で従来の PLC 用 CPU におけるラダー・プ ログラムを置き換えることにより、アプリケーショ ン・プログラムの可読性を高め、その開発と保守が 容易になる。

5. 加速器制御への応用

5.1 電源制御への応用

加速器の電磁石、高周波源などの電源で比較的大型のものは、内蔵コントローラとして PLC を採用することが多い。電源立ち上げシーケンス、出力電流のランピングなどの制御ロジックは特に EPICS Sequencer を用いることで、短期間に制御プログラムを開発することができ、また、開発後の保守性も向上し、長期に亘るメンテナンスが容易になる^[10, 11, 12]。

5.2 位置決め制御への応用

加速器制御では、可動電磁石、可動ビームマスク などをステッピング・モーターで駆動するための位 置決めが必要とされ、モータ・ドライバの制御に PLC の位置決め制御モジュールが利用される場合がある。 位置決め制御モジュールに対するコマンドの発行、 コマンドに対する ACK の確認、指示動作完了の待機 といった一連のシーケンスについても EPICS Sequencer を用いることで可読性と保守性の高いプロ グラムを書くことができる。また、上記の位置決め 制御は、独立した単軸位置決め動作の組合せである ことが多いため、制御対象となるモータ(回転軸) の数が多い場合には、一つのテンプレート化された プログラムと、軸ごとのパラメータを記述するパラ メータ・ファイルの組合せの形でプログラムが作成 できれば都合が良い。実際、EPICS Sequencer はテン プレート化に対応しているため、この条件を満たし ている[11,13]

5.3 データ収集への応用

FA-M3 には 50 マイクロ秒の変換周期に対応する ADC を備えたアナログ入力モジュールがあり、これ らを利用して比較的遅い信号を対象としたデータ収 集システムを構築することができる^[14]。

5.4 インタロック状態の監視への応用

インタロック状態の監視に EPICS on F3RP61 を用 いる場合は、これまでに述べた応用とは異なる側面 がある。第一に、インタロック、特に人的な保護の インタロックには非常に高い信頼性が求められるこ と。第二に、ロジックが単純な AND/OR の組合せで 組まれること、である。ラダー・プログラムは試験 のカバレッジが上げ易く、また、AND/OR で組むロ ジックを分かり易く表現できるため、インタロック のロジック自体の実装にはラダー・プログラムを実 行する従来型の CPU が向いている。しかし、この場 合にも F3RP61 はインタロックのステータスを EPICS からモニタするための CPU としての利用価値 がある。IOC プログラムを実行する F3RP61 は、従来 型 PLC 用 CPU と共に同一ユニットでマルチ CPU 構 成を採ることも可能であるし、また、必要に応じて PLC 専用のリンクで結ばれる大規模なネットワーク に参加することによって EPICS と従来型 CPUをイン タフェースすることもできる^[11]。

6. 今後の展開

EPICS on F3RP61 の今後の展開としては、世界に向 けての情報発信がある。加速器制御に PLC を多用す る傾向は日本に限られたことではない。PLC の利便 性による加速器制御システムへの浸透により、PLC の上位システムへの統合に際して抱える問題は世界 共通の課題であるにも関わらず、これまでに、この 問題に明快な答が提案された報告は少ない。EPICS on F3RP61は、日本発の技術として積極的に海外にア ナウンスしていく価値が十分あると思われる。この ような観点から、現在、時差がなくコミュニケーシ ョンが容易な東アジア地区に拠点を持つ加速器研究 施設との技術の共有を目指して協力関係を構築する 道を模索している。これまでに上海放射光施設 (SSRF)、高能物理研究所 (IHEP)、台湾放射光施設 (NSRRC) などから積極的な反応を得ており、これ らの研究機関において評価のための試験が進められ ている。サポート体制の整備に見通しが立てば欧米 への紹介にも積極的に取り組みたいと考えている。

7.まとめ

加速器制御システムで多用される PLC を IOC とし て用いる技術、EPICS on F3RP61 を開発した。同技術 は加速器制御システムにおいて各種電磁石電源の制 御、ビームマスクや電磁石などの位置決め制御、ビ ームモニタの処理回路からのデータの読出し、イン タロック状態のモニタなどの広範な応用範囲を持ち、 制御ソフトウェアの開発効率を高める上で効果的で ある。国内での実績により、海外の加速器研究施設 からの評価も得て、EPICS on F3RP61 導入に向けての 試験評価が進められている。

参考文献

- [1] 中村達郎. "EPICS 超入門" URL:http://www-linac.kek.jp/jisshu/EPICSintro.pdf
- [2] EPICS: Input / Output Controller Application Developer's Guide,

URL:http://icsweb.sns.ornl.gov/kasemir/train_2006/AppDe vGuide_3_14_8.pdf

- [3] EDM Extensible Display Manager for EPICS URL:http://www.aps.anl.gov/epics/docs/USPAS2007/lectu res/EDM.odp
- [4] EPICS R3.14 Channel Access Reference Manual http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/8-docs/CAref.ht ml
- [5] J. Odagiri, et al., "EPICS Device/Driver Modules for Network-based Devices", Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [6] Jiang Geyang, "Development of Embedded EPICS and its Application to Accelerator Control System" (総合研究大 学院大学高エネルギー加速器科学研究科後期博士課 程 博士論文)
- [7] 横河電機株式会社. 製品・サービス情報 URL:http://www.yokogawa.co.jp/rtos/Products/rtos-prdcpu 9-ja.htm

- [8] A. Uchiyama, et al., "Development of Embedded EPICS on F3RP61-2L", Proc. of International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC08), Ljubljana, Slovenia, Oct. 20-23, 2008.
- [9] State Notation Language and Sequencer Users' Guide URL:http://www.slac.stanford.edu/comp/unix/package/epic s/sequencer/manual/Manual.pdf
- [10] M. Mikawa, et al., "Embedded EPICS Controller for KEKB Pulsed Quadrupole Magnet Power Supply", Proc. of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS09), Kobe, Japan, Oct. 12-16, 2009.
- [11] M.Takagi, et al., "Control of the J-PARC Slow Extraction Line Based on Embedded EPICS", Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug 5-7.
- [12] M. Komiyama, et al., "Upgrading the Control System of RIKEN RI-Beam Factory for New Injector using Embedded EPICS", Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug 5-7.
- [13] T. Nakamura, et al., "Upgrading the Control System of the Movable Masks for KEKB", Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug 5-7.
- [14] S. Motohashi, et al., "Improvement of PLC-based Data Acquisition System for Beam Loss Monitors of the J-PARC Main Ring", Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug 5-7

J-PARC Main Ring のシステムコミッショニング

大越 隆夫 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第1研究系 〒300-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

J-PARC Main Ring(以下MRと称す)は初期取り 出しビームエネルギー30GeV、周長1.6kmの大型陽子 シンクロトロンである。加速器トンネルは地下約 10mにあり、地上部には付属施設として電源棟3棟、 機械棟3棟、搬入棟2棟と脱出棟3棟が配置されて いる。MRは3カ所の直線部と3カ所の曲線部から構 成されており、各直線部は 〇上流からのビームを 受ける入射部 〇パドロン施設にビームを供給する 出射部 〇ビームを加速する加速部とニュートリノ への出射部の役割を持つ。本報告はMRへの電磁石の 設置、ケーブル敷設等に関したことである。



写真1: 建設中の J-PARC

1.はじめに

J-PARCは2001年に建設に着手、2008年には第1 期工事が完成した。MRにおいては2007年12月より 加速器の総合機器調整を開始し、2008年5月23日 に3GeVビームによる入射・周回を行い、同年12月 23日には30GeVビーム加速に成功した。翌2009年1 月にはハドロン施設ヘビーム入射を行い、同年4月 にはニュートリノ生成を確認した。2010年2月には 岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデにおいて ニュートリノを検出した。

私が参加したのは2003 年 10 月からである。当初 の仕事の予定は膨大な量のケーブルの敷設に関して であったが、加速器機器(主に電磁石)のインスト ールが種々の事情から進んでいないために、私が所 属したシステムコミッショニンググループで行うこ とになった。主なことは、トンネルへの電磁石のイ

ンストール、電源棟への電源等のインストール、ケ ーブル選定と敷設、それらの機器に関わる冷却水配 管作業である。

	16年度	平成1	7年度		1	平成18年	度	平成19年度	Т		平成20年度	平成21年度
		20	05			2006		2007	Т	_	2008	2009
トンネル引渡	3-	50BT \$LB	21	>	D1) D2						
電源棟·搬入棟引渡	D	3.C2.M2				2.C1 D1			м			
8.Q.SX電磁石設置			孝儀		電磁石	12.22	-		日間会	R		
入出射機器								入射·HF·速取	機器目	Ĩ	進取·羅取	
ケーブル敷設							4	ブル教設	調査(ビ	調整	+	
トンネル冷却水						*			台		-	
電源棟機器設置			D3.2	24	TPS	D1.D2±1	HEPS	入射·進取PS	~		建取·置取PS	

表1: J-PARC MR 行程

これらの仕事を行うにあたり、各機器は大型で重 量物であって精密機器であること。約4年の作業期 間で1.6kmのトンネルと電源棟3棟にそれらの機器 をインストールする工程をたて、現場を指揮し、イ ンストールを無事に完成に持っていかなければなら ない。私には陽子加速器の経験もリングの経験も無 い。また、同時期にいくつかの作業を並行して行わ なくてはならない。このために「安全」「メンテナン ス性」「確実」「効率」「工期」を心掛けた。

2. トンネルへの機器インストール

MRの建設は、〇大鷹(絶滅のおそれのある国内希 少野生動植物種)の産卵 〇遺跡(松村白根遺跡) の発掘調査 〇地下水問題 〇地元の井戸枯れ等に より 2006 年 11 月末の完成予定と遅れた。しかし、 MR 加速器の総合機器調整は 2007 年 7 月を予定して いる。このままではインストール期間は 8ヵ月しか なく不可能である。このため、インストール開始目 標を 2005 年 9 月とした。このときトンネルは半周し か完成していないが、トンネルへの機器搬入に必要 な搬入棟の 1 棟(第 2 搬入棟)が 2005 年 7 月には完 成予定のため、搬入が可能になると判断した。イン ストール可能範囲は図 1 の赤・ピンクの範囲である。 図 2 は土木工事後の電気設備・空調設備・冷却水設 備・クレーン設備等の予定である。

インストール開始までに下記の洗い出しを行った。 トンネルが半周である、電気は仮設配線・仮設照明 である、空調整備は稼働出来ない、このような状態 における問題点と各グループの機器等の進捗状態の 情報収集である。



図1:トンネル工事完了予定



図2:トンネル設備予定



50GeV Ring Component List



表3:コンポーネントリスト(抜粋)

表 2:インストールスケジュール(案)は洗い出し を行いながら検討を開始した当初のスケジュール案 である。トンネル・設備の完成を追いかけるかたち で予定を組んでいる。

表3:コンポーネントリストは各グループの機器等 の進捗状況がわかるように、四極電磁石を基準にと ったアドレスとビームダクトを主としたコンポーネ ントから整理されている。アドレス内を構成してい るコンポーネント名称が記入され、寸法/担当者/製 作状況などが一目でわかるようにしてある。コンポ ーネント(2)の長さと真空用ガスケットの厚みを加 えると周長が求められるようになっており、コンポ ーネントの変更などに敏速に対応できるようになっ ている。また、MRは3カ所の直線部と3カ所の曲線 部で構成されていることも、トンネルに接続してい る電源棟からのサブトンネル位置、脱出口も記入さ れており、おおよその距離位置関係がわかるように なっている。

2.1 モックアップ

設計による電磁石設置位置を出来る限り正確にト ンネル平面図面に記入した。この結果、トンネル曲 線部の内周側壁は曲面ではなく平面が繋ぎ合わされ た多角形であり、冷却水配管の架台はこの面に沿っ て設置されるために、トンネル壁の角と架台設置が 重なり合った位置がトンネル内に最も突き出る。こ の架台位置と偏向電磁石の電極の位置がかなり接近 していることが読み取れた。この時点ではトンネル の角の変更は不可能であったことに加え、多少の変 更では土木建築工事の施行精度を考えると逆に接近 してしまうことになる可能性があったため、現設計 で進めることにした (MR 機器配置はビームの入射点 とニュートリノへの出射点から決定されるためにト ンネルの土木建築工事の出来に関わらず変更は出来 ない)。この点を含め 〇トンネル内のメンテナンス エリアの確認(特にトンネル内側) ○機器接続部 (電気端子・冷却水フランジ)の位置・接続方法の 確認 ○電磁石間に取り付けるモニター等の整合 性・取り合いの確認 ○機器の据え付け方法の確認 等を目的にトンネル内の機器設置のモックアップを 製作することにした。幸い、電磁石はほとんど完成 しており、モニター、真空ダクトも納品されたもの があったため、トンネルと冷却水配管架台等をコン パネ等にて模擬し、配置した。図3:モックアップ位 置は図面上で最も内側壁と機器間のスペースが狭い と考えられた場所である。



図3:モックアップ位置



写真2:モックアップ

写真3を見ていただければ分かるように壁と機器 間のスペースはケーブル配線、冷却水配管が行われ るため通行は不可能であり、保守作業を行うのはか なり窮屈である。偏向電磁石の電極の真横に架台が 設置されているとその間は250mm 程度になり、取り 付け作業も安全確保も難しくなるので、このような 状態になった場所は個々に対策することとした。ま た、電磁石の冷却水用流量計、調整用バルブもこの スペースにあるためかなり厄介であることが実感と して感じた。危惧したことが多々あったために MR 関係者以外からも意見・アドバイス・対策の情報を 集めるためにモックアップの見学会を行い J-PARC 関係者、KEK 職員に公開した。見学会では、電磁石 に合わせた治具の必要性、モニターの位置調整がし にくい、電極と給電側の取合いの検討、流量計の位 置の問題等多数の意見、感想をいただくことが出来 た。しかしながら、これら意見等には問題点の対策、 対処方法についての意見はほとんど無かった。ただ し、現状を理解する上では当事者以外の方の意見は 大変有意義であった。



写真3:メンテナンススペース

2.2 電磁石用ベースプレート

電磁石等の重量を長期間安定に受けること、機器 架台を受ける為に平坦な面を作る等の目的のために ベースプレート(鋼材)は設置されていることが多 い。MR においてもベースプレートを設置するために 歩床コンクリートの一部を電磁石の設置位置に合わ せ、面積約1~2m³深さ200mmの箱抜きを電磁石1台 に付き1~3ヶ所、リング全周では600ヶ所以上が計 画されていた。ベースプレートの設置方法は箱抜き した中に約 150~300kg の鉄板を鉄筋に触れないよ うに床と同じ高さに水平に固定し、無収縮モルタル にて残りの部分を埋めることになっていた。この作 業をトンネルの引き渡しを受けた後に行うと 〇機 器据え付けの工程がかなり厳しくなる ○費用が多 大 〇歩床コンクリート、モルタル、ベースプレー トの接合部に段差が生じるためにエアーパレットを 使用して設置が出来なくなる 〇ベースプレートと 電磁石の脚が一致しなかったときの対策(電磁石設 置位置はトンネルを片押しの測量で行い決めること になる)等の条件から検討を行った。

結果、歩床コンクリートに直接電磁石を設置する ことは出来ないかと考えた。危惧する意見としては、 〇コンクリート表面が電磁石荷重により徐々に破壊 し電磁石のレベルが変動するのではないか 〇床コ ーテング材のエポキシ塗装厚さが加重、温度によっ て変化するのではないかであった。電磁石荷重は偏 向電磁石脚底面にかかる荷重密度が最大で 1.8kg/cm²である。歩床コンクリート面に凹凸があり 電磁石脚底面と床面の接触が1%であったとすると 180kg/cm²となる。対して、歩床コンクリートの圧縮 強度は210kg/cm²、コーテング材(ケミクリートE) の圧縮強度は784kg/cm²であるため問題無いと判断 した。コーテング材の熱膨張は塗装暑さが2mmしか なく、対し電磁石の脚の長さは500mm以上あること から無視できると判断した。写真4:RCSのベースプ レートは1つの箱抜きに2枚の鉄板を設置している。



写真4: RCS のベースプレート

2.3 セラミックアンカー試験

加速器の電磁石は一般的に電源のアース点、もし くは決められたアース点に接続され、不明確なアー ス回路が出来ないように床とは絶縁をとる必要があ る。このため今回はセラミックアンカーを使用する ことにした。使用するにあたり、電磁石固定に使用 するサイズ (M20, M24) のセラミックアンカー (写真 5)を使用予定の定着材(写真6)を使用しコンクリ ートブロックに接着し 〇引張耐力試験 〇せん断 耐力試験を行った。結果、引張耐力試験においては カタログ値、計算値以上の十分な強度を持ち、コン クリート破壊が発生した。定着材で接着されたアン カーに引っ張り耐力を与えていった場合3つのモー ドの破壊形態が考えられる。コンクリートのコーン 状破壊による許容引張耐力 (Pa1)、ボルトの降上に よる許容引張耐力(Pa2)、定着材の付着強度による 許容引張耐力(Pa3)。計算によると許容引張耐力は (Pa1) < (Pa2) < (Pa3) となり、コンクリート崩 壊が最初に起こることになり試験結果ともあう。

	-	. , ,							
	Pal	(kN)	Pa2	(kN)	Pa3 (kN)				
	長期	短期	長期	短期	長期	短期			
M20	18.9	28.4	39.2	58.8	50.3	75.4			
M24	31.1	46.7	56.5	84.7	76.8	115.2			

表4:許容引張耐力



写真5:セラミックアンカー 写真6:定着材

引張耐圧試験は、写真7のように早強コンクリー トブロック(設計強度 21N/mm2, 1.5×1.5×0.6m) にセラミックアンカーを十分な距離を離し(円錐崩 壊 60度の2倍以上)、ハイテンションボルトを取り 付け油圧機器(油圧を測定)にて徐々に引っ張り上 げた。数度行ったがコンクリート破壊がおこる結果 となり、セラミックアンカーが破壊する、引き抜け る現象は全くなかった。



写真7:引張耐圧試験

せん断耐圧試験(写真 8)はコンクリートブロッ クの側面に取り付けたセラミックアンアーに寸切り ボルト(SS400 並目)をねじ込み、穴をあけた鋼板 を規定圧力によりナットで締め付け、鋼板を油圧機 器で徐々に引っ張る力を加えてゆくとある瞬間、瞬 時に鉄板が動き、鉄板によりボルトが切断される。 試験ではセラミックアンカーが破壊しボルトが引き 抜ける等はなかった。

	-	
M20	長期:27.4 kN	短期:41.2 kN
M24	長期:39.5 kN	短期:59.3 kN
	表5:許容せん	/断耐力



写真8: せん断耐圧試験準備とせん断面

試験	サイズ	平均耐力	破壊状態
되 말 티 아	M20	79.6 kN	コンクリート破壊
り広り	M24	134 kN	コンクリート破壊
11-) bkr.	M20	86.0 kN	ボルト切断
せん肉	M24	125 kN	ボルト切断

表6:引張耐力・せん断耐力試験結果

2.4 セラミックアンカーの放射線照射

セラミックアンカーを歩床コンクリートに接着す るための定着材は、有機材のため放射線による劣化 が心配される。このため、コンクリートブロックに 定着材により接着したアンカーボルトを日本原子力 研究開発機構 高崎量子応用研究所 コバルト 60 照射施設においてγ線照射試験(写真9)を行ない、 その後、引張耐圧試験により劣化の度合いを確認し た。照射試験場の関係からコンクリートブロック、 セラミックアンカー共に使用より小さいサイズ

(M12) にした。コンクリートブロックへのアンカー 接着作業は使用時と同じ条件で行い、5 コのブロッ クを制作した。全く照射しないブロックを基準試験 体 (0 Gy) とし、その他は積算照射線量が 0.7、3.9、 5.4、13.9 MGy であった。線量 10 MGy は MR のビー ムロスの多いところで約 20 年相当の線量であると 予想している。

定着材の強度低下を確認するための試験であるこ とを考え、コンクリート破壊を起こさないようにコ ンクリート表面をコア穴よりわずかに大きい孔をあ けた鉄板にておおい、その孔に引き抜き用のボルト (SNB7 材)を通し、油圧機器に取り付け引張り耐圧 を測定した(写真 10)。

Pa1 (kN)			Pa2 (kN)			Pa3 (kN)			
長期	短期	終局	長期	短期	終局	長期	短期	終局	
6.9	10.3	17.2	40.7	61.1	61.1	17.3	25.9	43.2	
表7	表7.放射線昭射に使用したM12の許容引張耐力								

写真9:高崎量子応用研究所コバルト60照射室内



写真 10: γ 線照射後の引張試験

γ線照射後の引張試験では定着剤の固着強度の低 下は見られなかった(表8参照)。γ線照射を行わな かった基準試験体の引張最大耐力は53.3~55.3 kN であり、これに対しγ線照射を行った4つの試験体の 11個のアンカーでは引張最大耐力は50.2~61.1 kN (平均53.9kM)であった(アンカー1個は同じ試験体 の別のアンカーの試験時に発生したコンクリートの クラックによる影響があるため除いた)。

定着剤は通常の状態で固着するとピンク色であっ たが、照射線量が増加すると黒ずんでいき褐色にな った(写真11、12)。セラミックアンカーも乳白色 から茶色くくすんできた。γ線照射を行ったセラミ ックアンカーにおいて、本体内ネジ部のセラミック のねじ山がボルトのねじ山によって削られるように 破損するものが発生した。この破損時の耐力は50.2 ~55.0kNであり、セラミックアンカーのねじ部の保 証耐力51.4kNと同じであった。セラミックアンカー をハンマーでたたき砕くと線量の多いものほど簡単 に顆粒状になり劣化が進んでいることが認められた。

積算照射量	試験体番号	最大耐力 (kN)	破壊形態
0 MCv	0 MGy-1	53.9	母材破壊
1 MGy 其淮試驗休	0 MGy-2	53.3	母材破壊
金平时候种	0 MGy-3	53.3	母材破壊*
	1 MGy-1	54.1	母材破壊
0.7 MGy	1 MGy-2	54.2	母材破壊
	1 MGy-3	52.3	母材破壊*
	3 MGy-1	54.6	抜き出し
3.9 MGy	3 MGy-2	55.0	抜き出し
	3 MGy-3	51.3	抜き出し
	6 MGy-1	50.3	母材破壊
5.4 MGy	6 MGy-2	61.1	鋼材降状
	6 MGy-3	38.0	母材破壊*
	10 MGy-1	50.2	抜き出し
13.9MGy	10 MGy-2	54.9	抜き出し
	10 MGy-3	54.9	抜き出し

抜き出し:セラミックアンカーの本体内ねじ部破壊 母材破壊*:試験体-1、-2の母材破壊による影響 表8:γ線照射による試験結果





写真 11: 基準体アンカー 写真 12:13.9MGy 照射後

子英 12:15. 5MOy 2831

2.5 インストール前の確認

トンネルへのインストール電磁石としては、偏向 電磁石(32ton、96台)、四極電磁石(10~15ton、 216台)、六極電磁石(3ton、80台)、ステアリング 電磁石(0.4ton、186台)、3-50BT 用電磁石(58台) を予定した(入出射機器は今後検討とした)。3-50BT 用電磁石においては、RCSの区域に設置するものが あるために2007年3月までにケーブル、冷却水配管 を含め終了する必要があった。

受入場所・仮置・搬入口は建設途中のため第2搬 入棟だけである。第2搬入棟前のテントハウスはス テアリング電磁石等の納品機器でいっぱいであった。 このため、仮置できるスペースがないために偏向電 磁石、四極電磁石は磁場測定後、ビームダクトを挿 入し、納品工程を厳しく管理しインストール出来る 台数だけ搬入することにした。加えて、偏向電磁石 を運搬できる大型低床トレーラーは県下にはわずか しか無いため、搬入工程の管理は正確に行わなくて はならない。

トンネルの一部が使用できるようになって最初に 行ったことはエアーパレットの動作確認試験である。 モックアップ場、つくばの北カウンターホールにお いて薄鉄板の上などで簡単な動作試験は行っていた が、エポキシ樹脂の床上走行において長距離の移動 を行うことはこれまでなかった。この動作確認では、 〇エポキシ床における動作確認〇搬送速度(空荷、

荷重時) ○故障時の対応 ○横引きの方法につい て行った。この中で最も考えさせられたのは、電磁 石を通路から設置位置に横引きしなければならない 時の安全性であった。エアーパレットは浮上した状 態では力を加えなくても、床がわずかに傾斜してい ると動き出してしまう。それは、32 トンの偏向電磁 石であっても同じであり、重いものほど動き出した ものを止めることは危険で1、2 名では止めることは 難しい。そのため、電磁石と壁に挟まれることが最 も危険と考えた。このためいくつかの治具を制作し 試験を行った。治具を丈夫にする・横引きをワイヤ 一等で行うとなどを試みたが、移動やセットアップ に時間がかかり過ぎる割に動作が今ひとつであった。

エアーパレットを使用し電磁石の据え付けを行った場合、どの程度の精度に設置できるかも確認する 必要があった。電磁石架台の調整可動範囲は概ね20 ~30mmであることから5mm以内を目標とした。

以上のことを確認し、その後のインストール計画 を詳細に決定するために、全体の約5%の電磁石のイ ンストールを2ヶ月かけて行った。この結果、〇電 磁石の納品工程は偏向電磁石:約6台/週(1日置き 2台)、四極電磁石:6~12台/週 〇床のセラミック アンカー設置は別班が先行作業する 〇エアーパレ ット走行・作業中は安全を重視し作業員4名以上指 揮者1名とする 〇エアーパレットの横引きはスト ッパーの役目と安全のためにパイプを壁に設置する 〇作業の進め方を作業員に教育すること(安全教育 の実施) 〇電磁石設置精度は架台固定状態で 3mm 以下に設置可能であることを確認した。 実作業は2005年11月~2007年3月の約1年4ヶ月

であった。表9は搬入計画の一部である。

想定外のアクシデントがいくつかあった。トンネ ルが未完成での作業開始であったため、トンネル工 事側から外気が入りやすく、空調設備も稼働してい ないために結露した水滴が雨のように落ちてくる。 対策はトンネルの両端にシートを2重に張り、除湿 器をつくばから持ち込んで除湿した。しかし、除湿 が行き届かないサブトンネルではカビが大発生した。 写真 14 の壁の黒いのはカビであり、天井右側に粒の ように見えるのは水滴であり天井・壁全体に水滴は 付いている。



表9:トンネル電磁石搬入計画



写真13:エアーパレット横引き試験



写真14:結露

3. ケーブル敷設

MR に敷設したケーブルは概ね総長で 1000km、重量 1700ton、敷設本数 3000 本である。作業は 2007 年 1 月から開始され、途中で ○総合機器調整 ○3GeV ビーム受け入れ・周回時は休工をしたが、実作業は 1 年 3 ヶ月で行った。作業員の最大は 120 人/日であ った。写真 15 でもわかるとおり電磁石が設置された 後の作業であるため、作業員の安全性、電磁石の保 護を考え、安全性の高い足場設置、効率的な配線手 順等の検討を行いながら進めた。当初より、ケーブ ルリストを制作して両端の接続先、ケーブルの種類、 長さ、端末状態等を明確にした。現在もケーブルリ ストは追加配線する際に大いに役に立っている。



表 10:ケーブルリスト



写真 15: トンネル内の足場

3.1 ケーブルの敷設・選定

ケーブルの敷設・選定にあたり、〇敷設スペース の制約 〇ケーブルの規格 〇ケーブルの電流密度 〇耐放射線性等を考えた。電源棟からトンネルにケ ーブルを敷設する経路は、各電源棟からサブトンネ ルを経由し、主トンネルの約500m (1/3以上)をカ バーするためサブトンネルに大量のケーブルを敷設 しなければならない。このためサブトンネルでは両 壁に合わせて16段(W:600)のケーブルラックを設 置した(図4のサブトンネル断面図)。それでも、最 初からケーブルは俵積み状態となるため、特に電力 ケーブルでは発熱を考慮し、上下のケーブルの間に アルミの角材を入れ空間を空けるようにした。電流 密度は 2A 以下として設計をしたが、実際には最大 1.6A に落ち着いた。信号線、特にモニターのアナロ ク信号線においては大電力・パルスの電力ケーブル から出来る限り離れているケーブルラックに敷設す るようにした。敷設作業においても、ノイズに関し ても、その後の保守においても敷設の最大の難所は サブトンネルの入り口と出口である。ケーブルの交 差が多く、曲げなければならず、ノイズ対策等がし にくく、苦しいところである。



図4:第2電源棟サブトンネル断面

加速器トンネルで使用されるケーブルに求められ ることは 〇難燃性 〇耐放射線性 〇グリーン購 入法等がある。難燃性については J-PARC ではガイド ラインが決められており、トンネル等の洞道におい ては高難燃性ケーブル (IEEE Std-383 垂直トレイ試 験に合格したエコケーブル (NH))、放射線管理区域 で無い建家の屋内屋外では難燃性ケーブル (JISC3005 4.26 60 度傾斜試験に合格したエコケー ブル(EM))と決められている。グリーン購入法は国 等による環境物品等(環境負荷低減に資する製品・ サービス)の調達の推進等に関する法律のことであ る。耐放射線性については検討時期には特段なケー ブルが無かった(性能、納期、価格において見合う) ため架橋ポリエチレンケーブルにした。しかし、最 近 2.5MGy まで耐えるケーブルが出てきたことから 可能な範囲で使用を進めている。

3.2 主電磁石の給電

偏向電磁石用電源は 5500V 3015A、四極電磁石用 電源は5400V1534A(50GeV時)と高電圧、高電流で ある。このため当初計画ではこれらの電磁石用の給 電にはトンネル内はホロコンダクター(以下ホロコ ンと称す)による給電が計画されていた。しかしな がら、ホロコンサイズが 25×25~30×30 (mm) 程度 になるために、工場の生産ライン関係、運送方法か ら1本の長さは約12m程度になる。このためトンネ ル内のホロコン接続箇所は約2000カ所以上になる。 信頼性が高いと考えられるインサート式で接続し、 高周波加熱によって熱むらを出にくくした接続とし ても、経験等から長期間にわたって全く水漏れが無 いとは考えにくい。そのため、ホロコンが設置され るトンネル内周側壁中央部(図5左側冷却水配管の 上部)に設置された14本のホロコンのどこかで水漏 れが起きた場合、さらに電磁石等が放射化した後と なると作業が大変厄介になる。また、電磁石への引 き出し線は高電圧のホロコンの隙間を通さなければ ならない。さらにホロコンの熱膨張を考慮した固定 方法を行う必要がある。ブスバーに冷却水配管を沿 わせたもの(冷却水路と電気回路を分離)等も検討 したが、冷却水の漏れは格段に改善されるが、熱膨 張が大きくなりブスバーの固定方法、機械的疲労が 大きくなる等の問題において難しくなる。トンネル 内でホロコンを使用する時でも、電源からトンネル 入り口までは高圧ケーブルを使用するので、このま まケーブルを延長して使用できないかを担当者に検 討(抵抗値低下、静電容量増等)を依頼した。可能 であろうとのことなので高圧ケーブルで給電を行う ことに変更した。変更により、問題点は電磁石への 引き出し部にしぼられた。大きなブスバーを使用す ることにより高圧ケーブルを受け、電磁石には可動 性の優れた電線により接続し、アライメント時に電 磁石の調整を可能にした。高圧ケーブルの端末には 電界が集中するため処理方法、端子、ストレスコー ン等に注意を払い、ブスバーを固定するための碍子 には放射線劣化を気にしたが、測定・保証したもの は無いため、出来る限りセラッミクの碍子を使用す るようにした(セラミックの碍子は減っている)。 ホロコンからケーブルに変更したことで、信頼性・ 保守はかなり改善されたと考えている。



図5:トンネル曲線部断面



写真16:高周波ロウ付け

5. 電磁石の対象化

電磁石電源出力からのコモンモードノイズ、ノー マルモードノイズが電磁石の磁場を変化させるため ビームに影響を与えている。このため早急の対策が 必要であるが、電源での早急の対策は難しいことか ら下記のことを行うことになった。ノーマルモード ノイズに対しては、電磁石もしくは電磁石近傍にダ ンピング抵抗を取り付ける対策により低減させる。 コモンモードノイズに対しては電磁石本体の配線を 変更し低減させることにした。配線の変更とは四極 電磁石を例にとると、一般的には1台の電磁石は S →N→S→N と4極は直列に1回路で接続されている が、変更により S→S、N→Nの2回路にわけ、電源か らの配線も変更し電磁石を S 極、N 極の対称な回路 (図 6) になるように変更する。本電源は接地点で 対象な回路構成であるためコモンモードノイズによ って発生した磁場はビームが受ける磁場においては キャンセルされた状態になる。この対策を偏向電磁 石と四極電磁石に行い、心配されていた 3GeV (入射 エネルギー)から 30GeV への加速が成功した (2008 年 12 月 23 日)。



図6:対象化後の配線

電磁石の配線変更は各電磁石のタイプで異なる。 偏向電磁石(96台)は電磁石が上下分離の構造であ ったことから、ブスバーブ部の高圧ケーブルの接続 と引き込み線の変更を主の変更として行った。四極 電磁石は4極間を繋いでいたブスバーを撤去し、放 射線の低い範囲は可動性のよい電線で接続し、放射 線の高いところではアルミのブスバーにより接続を 行い、1回路構成から2回路構成に変更を行った。 構造的に動かしようの無い電極があるため離隔をと ることに苦心した。1段2枚だったブスバーブ部は2 段4枚に変更し、高圧ケーブルの接続を変更した(写 真17、18の上部)。作業は台数が216台あることか ら数班による同時進行で進めることにし、作業性の 向上とミスを少なくするために ○電磁石の配線変 更はすべて同じ配線ルートとした(アルミブスバー の9台を除く写真19) ○最初の1台をバグ出し のためのモデルとして配線試験を行い、詳細を決定 した。これらのことで作業は順調に進み四極電磁石 の作業は4週間で完了した。

作業は電磁石をビームラインに設置したままで行 うために、作業部位に必ずあるチタン性の整形ベロ ーズを保護することが必要であった。加えて、写真 20、21のように電磁石の電極の近傍にはゲートバル ブ、イオンポンプ等が設置されているため、これら の機器と新しい配線の離隔確保等の問題を解決して の作業であった。計画にない急な作業のうえ、設置 終了後のビームラインに設置したままの作業である ため計画設計も大変でであったが、現場での作業に おける準備、作業手順、信頼性等の確保が最も苦心 した。





写真17:対象化前

写真18:対象化後



写真 19:アルミブスバー 高放射化に対応



写真 20:ゲートバルブ 写真 21:イオンポンプ

5. 最後に

この仕事を行うにあたって心掛けた「安全」「確 実」「効率」「工期」についてはおおよそ守れたと考 えている。しかし、「メンテナンス性」(特に放射化 メンテナンス)についてはもう少し努力すべきだっ たかと考える。放射化が高いと推察される部分の電 磁石には流量計の位置変更等の改修等を行ったが、 大多数の電磁石は納品の状態で設置した。メンテナ ンス性の向上は今後も進めていかないと放射化した 後では難しくなる。完成したものに手を加えること は設計も面倒で難しいものであるが特に時間と費用 を費やす。下調べと準備が心掛けを支えたと考えて いる。

謝辞

J-PARC MR という大きな加速器の建設に関われる 機会を与えていただいたことに深く感謝いたします。

少し遅れて参加したことによって別の目で見るこ とが出来たこと、当事者になってもがき苦しんだり したこと。多くのことを学ばせていただきました。 施設部が行っている土木建築、設備関係にもわずか ですが関われ、加速器のトンネルを建設するとはど のようなことなのかを肌で感じました。

無事にここまで進めてこられたのは、関係した企 業の協力、施設部の方々の協力・助言であり、見え ないところでの契約課の方々や事務の方々の協力・ 手助けがあってこれだけの規模の仕事が出来ました。 特に小林仁教授、吉岡正和教授には感謝いたします。 技術賞がインストールのような地味ではあるが確実 に行わなくてはならない技術や作業を評価していた だいたことに感謝いたします。

参考文献

- Takao Oogoe, et al., "The Ceramic Anchor which Fixes a Electromagnet", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, Hiroshima, Aug. 6-8, 2008
- [2] Takao Oogoe, et al., "Status and Schedule of J-PARC 50GeV Synchrotron (3)", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan the 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, Wakou, Aug. 1-3, 2007
- [3] Takao Oogoe, et al., "Status and Schedule of J-PARC 50GeV Synchrotron (2)", Proceedings of the 3th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006
- [4] Takao Oogoe, et al., "Status and Schedule of J-PARC 50GeV Synchrotron", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, July. 20-22, 2005

編集後記

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

推薦された技術賞候補案件は、各研究所、研究施設、技術部及び管理局から選出された委員 による「KEK技術賞専門部会」において審査されます。審査は各推薦者によるそれぞれの技 術内容紹介と技術開発現場における候補者本人による内容説明を必ず行った上、部会において 審議、最終判断を行ないます。その際、より充分な検討を行なうため、追加資料を本人から提 出してもらい、昨年度から被推薦者本人が申請課題について説明することとしました。こうし た審査を経て、技術賞が決定され機構長に推薦されます。

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

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

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

> 平成22年6月 出版担当 人事労務課福利厚生室 専門職員(福祉担当)