

KEK Internal 2008-4

July 2008

A/H/M/R/D

平成 1 9 年度

KEK 技術賞 受賞論文集

The KEK Technology Prize 2007



High Energy Accelerator Research Organization

© High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2008

KEK Reports are available from:

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

Phone: +81-29-864-5137

Fax: +81-29-864-4604

E-mail: irdpub@mail.kek.jp

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

序 文

平成 19 年度 KEK 技術賞専門部会
部会長 春山 富義

KEK 技術賞は平成 12 年度に発足し、受賞対象となった KEK 発の優れた技術は、「KEK 技術賞受賞論文集」として刊行され、広く世に伝えられる。今回、ここに平成 19 年度受賞論文集を刊行する。本論文集に掲載された受賞論文数は 3 件である。いずれも専門部会において行なわれた技術内容ヒアリング、および技術開発現場での開発者本人との十分な質疑応答を経て、受賞された技術である。専門部会では受賞技術内容を適切な時期に刊行することが技術の「伝承」と言う点で重要であることをふまえ、受賞の皆様に迅速な論文執筆をお願いした。その結果、ここに論文集の早期発刊を実現することができたものである。

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

1) 技術への取り組みが創造的である (創造性) :

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

2) 技術の具体化への貢献、成果が顕著である (具体化) :

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

3) KEK の推進する研究計画への技術貢献が顕著である (貢献) :

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

4) 技術伝承への努力が積み重ねられている (伝承) :

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

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

平成19年度 KEK技術賞 受賞論文

目 次

序文

受賞論文

1. MO型フランジの加速器ビームダクトへの応用・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
白井 満 (加速器研究施設)
 2. 長尺ビームダクト用窒素化チタン (TiN) コーティング装置の開発・・・・・・・・・・ 9
久松 広美 (加速器研究施設)
 3. 4GHz 10bit ADCモジュールの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
池野 正弘 (素粒子原子核研究所)
- 編集後記・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27

MO 型フランジの加速器ビームダクトへの応用

白井 満

高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

KEK-B 加速器における真空ダクトは、主に円形、およびレーストラック型の断面形状をしている。接続フランジの真空シールには高周波の励起を抑えるため RF ブリッジも兼ねたメタルガスケットが主に使用され、接続部分でのギャップの深さや幅は 1~2 mm 程度に抑えられている。しかし、将来の大電流蓄積型加速器を考えた場合、接続部での条件として (1) 余分な高周波・放電の発生を抑えるため内面に段差、ギャップがほとんど無いこと、(2) 確実な電氣的接触があること、(3) ダクト内表面を流れる壁電流による発熱に耐える高い熱的強度があること、等が要求される。また、真空ダクトは、偏向電磁石によりビームが曲げられたときに発生する強力なシンクロトロン放射光に対処するためアンテチェンバー部を持った複雑な断面形状のものとなる。これらの点を考慮した場合、従来のメタルガスケット、あるいは断面形状に合わせた RF コンタクトフィンガーとガスケットの組み合わせでは、不十分な点が多く信頼性に欠ける。

近年 C バンド導波管用に開発された MO 型フランジを Fig. 1 に示す。このフランジは RF ブリッジも兼ねた銅ガスケットを用い真空をシールする。ガスケットはダクトの断面と同じ形状をしており、接続の際内壁面に隙間も段差もほとんどできない。また、電氣的接触も良く熱的強度も高い。さらに複雑な開口面を持った形状にも対応可能であるため、大電流蓄積型加速器の真空ダクト間の接続に非常に適していると考えられる。しかし、MO 型フランジは比較的単純な開口面 (円形、矩形) に対しての真空シールには実績があるが、より複雑な開口面での使用例が未だない。そこで今回、将来のアンテチェンバー部を持った真空ダクトに対して、MO 型フランジが適用可能であるか、試作フランジを製作し実験的に調べた。更に、構造解析、最適化を行い実機への適用を試みることにした。

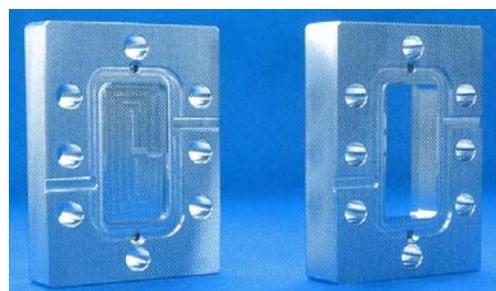


Fig. 1 導波管用 MO 型フランジ

2. フランジの試作

2. 1 構造

試作したフランジを Fig. 2 に示す。真空ダクトはビームが通る円形部、シンクロトロン放射光 (SR) が通るアンテチェンバー部が組み合わさった鍵穴型の形状をしている。円形部の半径は 45 mm、アンテチェンバー部の高さは 14 mm、円形部中心からアンテチェンバー奥までの寸法は 112 mm である。フランジの厚みは一般的なフランジを踏襲して 25 mm とした。ボルトは M 8 を 17 本使用し、ボルト穴に関してはシール面

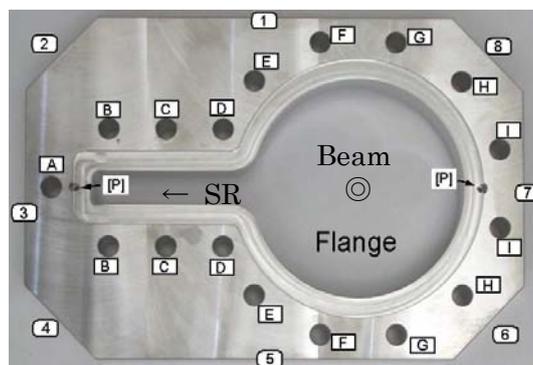


Fig. 2 試作フランジ

に対し均一に圧縮力が掛かるであろうと思われる位置に適当に配置した。

真空シール部断面の模式図を Fig. 3 に示す。真空シール方式は C バンド導波管用フランジのものを踏襲している。シール幅は 0.8 mm、シール部高さは 0.35 mm、表面の鏡面加工は行っていない。フランジ接続当初、フランジ間には 0.5 mm 隙間が開き、締め付けを行うことによりガスケット片側で最大 250 μ m ずつ潰れる仕様となっている。ガスケットは厚さ 1.5 mm、材質は焼きなました純銅製で Fig. 4 に示すように、開口面が垂直な場合でもガスケット固定・フランジ位置決め用のピンが左右 2ヶ所配置されていることにより、落下や位置ずれすることなく接続が可能となっている。

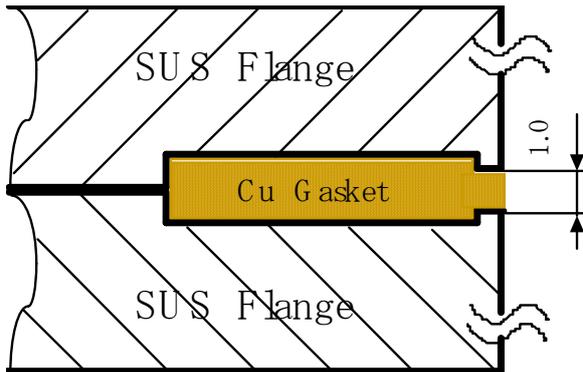


Fig. 3 シール部断面模式図

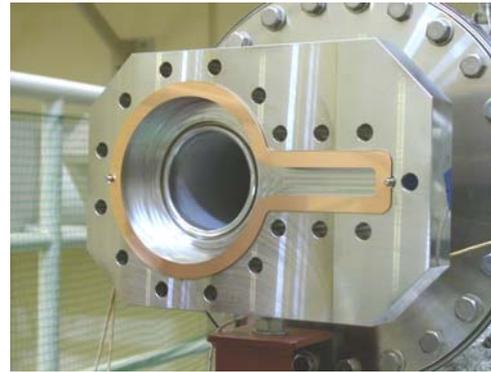


Fig. 4 ガスケットを装着したフランジ

2. 2 試験

2.2.1 内面検査

目視によりフランジ接続部内面の検査を行った。従来のメタルガスケットと MO 型メタルガスケットの内面写真を Fig. 5、Fig. 6 に示す。従来のガスケットでは断面形状が円形であるため接続部でのギャップが 1~2mm 発生するのに対し、MO 型ガスケットではギャップも出張りもほとんどできないことがわかる。

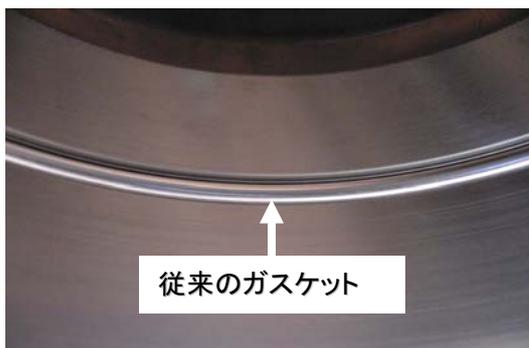


Fig. 5 従来のメタルガスケット

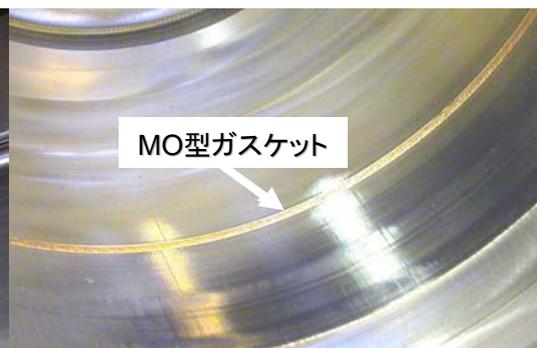


Fig. 6 MO型メタルガスケット

2.2.2 軸力測定

ボルトの締め付けトルクと軸力との関係を調べるため、Fig. 7 に示すような軸力計（東日製作所：1.3 - BTM）を用い試験を行った。ボルトは M8 (SUS 316 XM-7) を使用し、条件として潤滑剤無しのもの、二硫化モリブデンを塗布したものとで各 10 回ずつ測定した。

測定結果を Fig. 8 に示す。潤滑剤を塗布することにより、約 40 % 軸力が増すことが確認

できる。また、ボルトの有効断面積および耐力からボルト 1 本当たりにかかる許容軸力は約 12 kN 程度であることから、締め付けトルク 25 Nm 程度以下で真空シールが可能であれば、ボルトの強度的には全く問題ないと判断できる。



Fig. 7 軸力測定

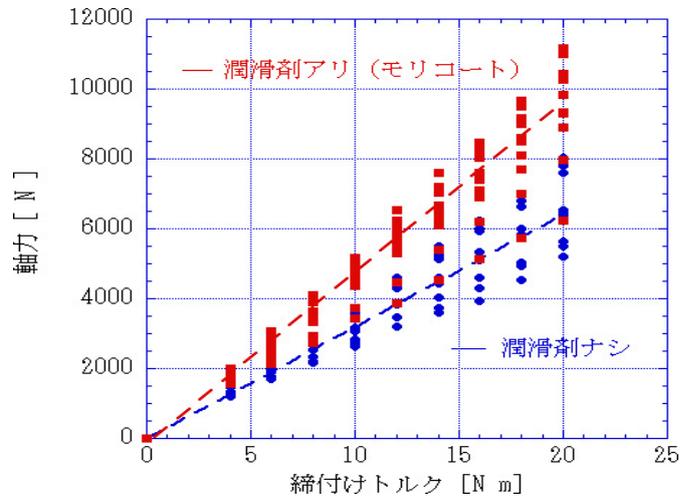


Fig. 8 締め付けトルクと軸力の関係

2.2.3 ガasket潰れ量と硬度の変化

真空シール部におけるガスケット潰れ量と硬度の変化を調べるために、締め付けトルク 18 Nm で締め付け後のガスケットを用い、レーザー変位計及びビッカース硬度計を使用して測定を行った。まず、ガスケット潰れ量の結果であるが、円形から四角形部へ移行する部分での潰れ量が片側 $150\ \mu\text{m}$ であったのに対し、他の部分では片側 $250\ \mu\text{m}$ ずつ潰れていることがわかった。このことから移行部分でのガスケット圧縮応力が他に比べ少ないであろうということが推測できる。次に硬度測定の結果であるが、Fig. 9 に示すように、締め付け前にビッカース硬さ $H_v = 40$ 程度であったものが、締め付けを行うことにより $H_v = 60 \sim 80$ 程度まで上昇していることがわかる。すなわち、硬度が上昇することにより弾性が増し、真空シール特性も向上するものと考えられる。

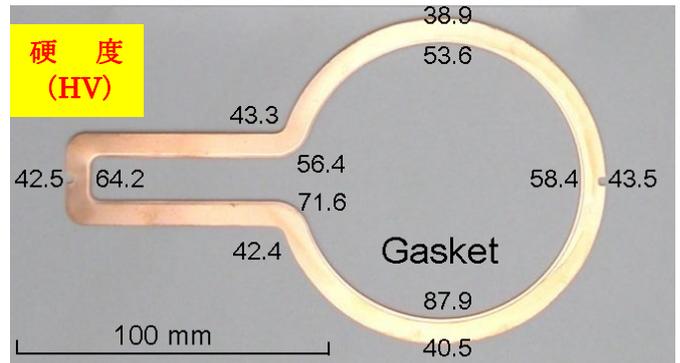


Fig. 9 ガasket硬さ測定結果

2.2.4 リーク試験

ボルトの締め付けトルクとリーク量の関係を調べるために、He リークディテクターを用いて、各締め付けトルクにおいて均一に締め付けた場合でのリーク量の測定を行った。結果を Fig. 10 に示す。締め付けトルク 18~19 Nm で真空シールが可能であることがわかった。He リークディテクターの最高検出感度は $1 \times 10^{-11}\ \text{Pa m}^3\text{s}^{-1}$ である。このときのボルト 1 本当たりの軸力は 7 kN~10 kN

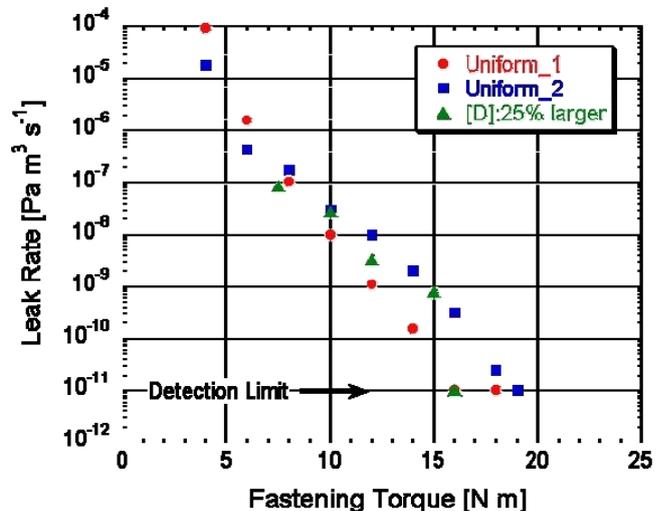


Fig. 10 締め付けトルクとリーク量の関係

となり、ボルト強度的に安全であることが確認できた。また、線平均圧縮応力は $340\sim 380 \text{ Nmm}^{-1}$ となり、一般的な真空フランジと比較した場合、同等もしくは 10% 程度大きい値となっているが特に問題はないと判断した。また、ガスケット潰れ量の結果から、円形から四角形への移行部分での圧縮力が他に比べ少ないことが推測できるので、Fig. 2 中でのボルト D 部のみ 25% 増しで締め付けし測定を行ってみた。その結果、より少ない締め付けトルク (16 Nm) で真空シール可能であるということがわかった。

2.2.5 ギャップ測定試験

リーク試験と並行して各締め付けトルクにおけるフランジ間の距離を、隙間ゲージを用いて測定した。測定結果を Fig. 11 に示す。Position No.1~8 は、Fig. 2 におけるフランジ辺 1~8 に対応している。結果をみると、Position 2~4 (四角形部) にかけてのフランジ歪み量が大きく、締め付けトルク 18 Nm でほとんど隙間が無くなってしまったことがわかった。

2.2.6 ベーキング試験

リーク試験にて真空シールの健全性を確認後、 150°C 、 200°C 、 250°C の各温度でベーキング試験を行った。ベーキング装置およびベーキング時の温度パターンを Fig. 12 および 13 に示す。

ベーキングは温度調節コントローラーを使用して、2~4 時間で各温度まで昇温し、24 時間保持する。その後、数時間かけて 100°C まで下がったところでヒーターを OFF する。試験後、He リークディテクターを用いてリークテストを行ったところ、各温度とも漏れは無く、 250°C までの温度変化に対する真空シール健全性が確認された。

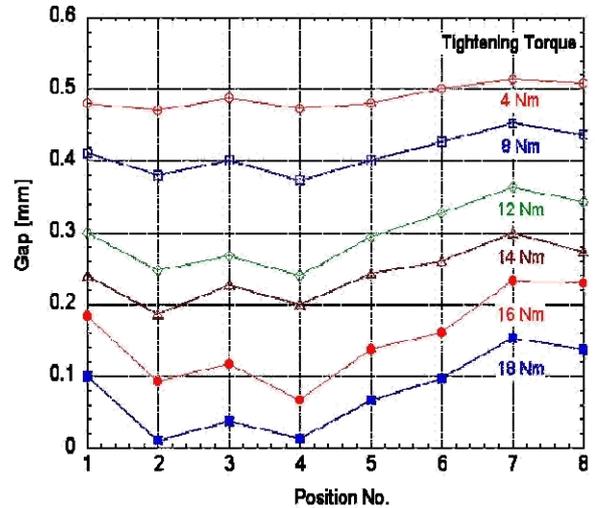


Fig. 11 各締め付けトルクにおけるフランジ間ギャップ

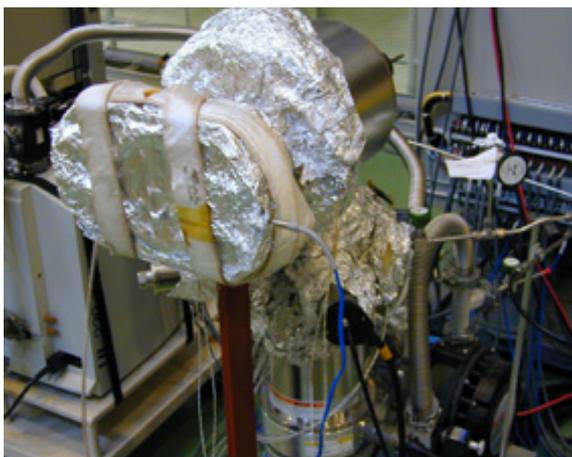


Fig. 12 ベーキング試験装置

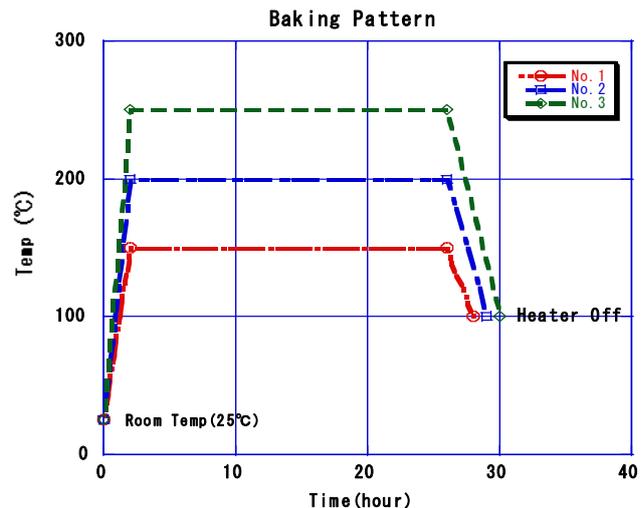


Fig. 13 ベーキング時の温度パターン

2.2.7 ねじれ試験

実際の加速器ビームダクトへの応用を検討した場合、大量生産されるダクトの製作過程での誤差、設置の際における設置誤差等を考慮する必要がある。通常真空ダクト間にはペロー

ズチェーンが取り付けられ水平・垂直方向にずれが発生しても吸収できるようになっている。しかし、ベローズチェーンはフランジ面でのねじれに対して吸収範囲が狭く、ダクト間でのねじれが発生した場合に問題となる。そこで、フランジ端で最大 0.5 mm のねじれ (5 mrad) がある場合での真空シール試験を行った。測定方法は 2.2.4 で述べたリーク試験と同様である。試験結果と内部のシール面を Fig. 14 および 15 に示す。

測定は 2 回行ったが、フランジ間に 5 mrad 程度のねじれがあった場合でも 19~20 Nm で真空シール可能であるという結果を得た。また、フランジ内面を目視により確認したところ、アンテチェンバー部分に 0.1~0.2 mm 程度のギャップ、出っ張りが発生することを確認した。しかし、ビームが作る電場はビームが通る部分では強いが、アンテチェンバー部では弱いので、この程度の段差は問題ないと判断した。

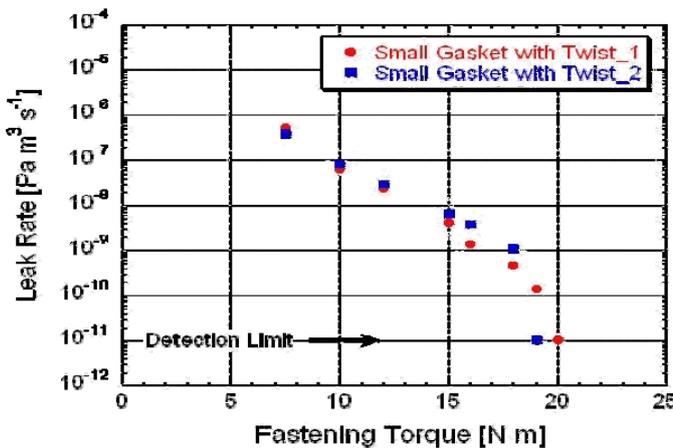


Fig. 14 締付けトルクとリーク量の関係

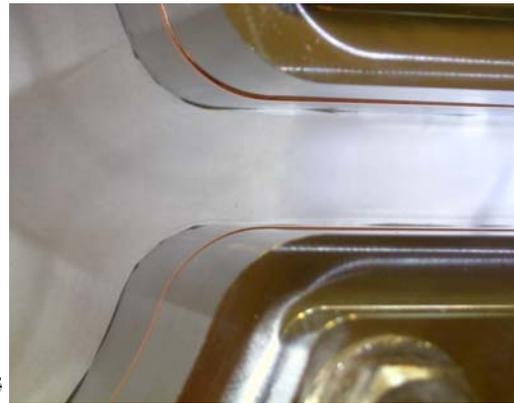


Fig. 15 フランジ内部のシール面

3. 構造検討

上で述べた各試験結果から、試作したような複雑形状を持つフランジでも良好な真空シール性が得られることが確認できた。しかしながら、実際の加速器ビームダクトへの応用を検討した場合、下記に述べる問題点がありこのままでは不十分であると判断した。

- 1) ボルト締付け時におけるフランジの変形が大きく、シール面に一様な力が働きにくい。
- 2) 円形から四角形部へ移行する部分での圧縮力が他の部分に比べ弱い。

以上の問題点の解決を探る糸口として、解析ソフト ANSYS 7.0 を用いた構造解析を行うことにした。

3. 1 試作フランジの応力・歪み特性

試作フランジにおいて、ボルト当りの軸力を 6000 N 加えた場合の圧縮応力と歪み量の解析結果を Fig. 16 および 17 に示す。計算におけるフランジのヤング率は $1.97 \times 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$ (ステンレス) とした。しかし、銅ガスケットに関しては実際には塑性変形をおこすため通常の弾性範囲での解析は不可能である。そこ

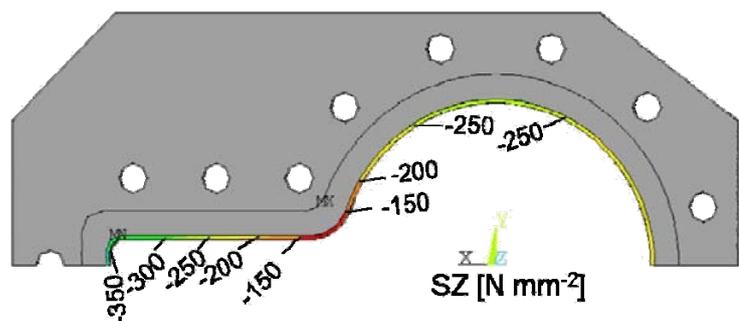


Fig. 16 圧縮応力

で仮に非常にヤング率を小さい値 ($1 \times 10^3 \text{ Nmm}^{-2}$) として、応力・歪みの傾向を探ることにした。

まず、圧縮応力の結果(Fig. 16)であるが、円形から四角形へ移行する部分での値が最も小さくなっている。この結果はガスケット潰れ量の測定結果と定性的に一致している。次に、歪み量(Fig. 17)に関しては、最大と最小で約 4 倍程度バラツキがあるという計算結果が出た。Fig. 2 における Position 2~4 (四角形部) にかけての歪み量が多いという点はギャップ測定結果ともよく一致している。

以上のことから、構造解析による計算結果は、各種試験結果と非常に良く似た傾向を示しており、最適化にあたって、非常に有用であると判断した。

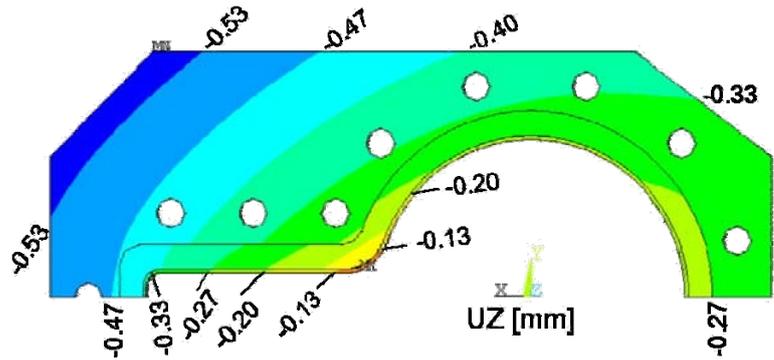


Fig. 17 歪み量

3. 2 最適化

先に述べた試作フランジにおける幾つかの問題点を解決するため、先程の構造解析モデルを用い最適化を試みた。まず歪み量の低減と圧縮応力の均一化を測るためフランジ厚を 25 mm から 30 mm へ変更し、ボルト B,C をできるだけ D 側に移動させ計算を行ってみた。歪み量の結果を Fig. 18 に示す。最適化前と比較して、歪み量のバラツキが約半分に低減されるとともに、円形から四角形へ移行する部分での圧縮応力が約 50 % 増大することが確認できた。

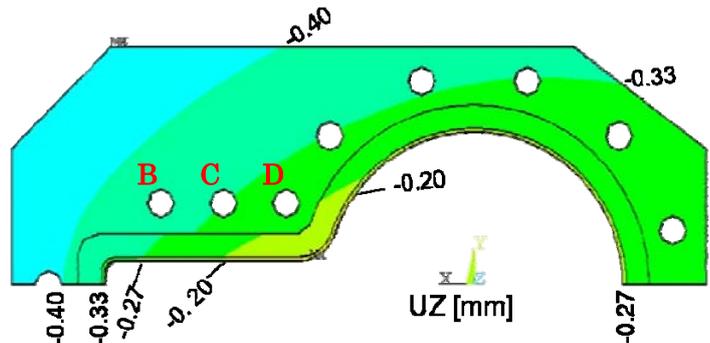


Fig. 18 最適化後の歪み量

4. 実機への応用

4. 1 実機用フランジ構造

これまでの各種試験、フランジ最適化の結果をもとに、より実機に近い形状のフランジを設計した。フランジおよびガスケットを Fig. 19 に示す。

設計した今回のフランジは、両側にアンテチェンバー部を持ったプロペラ型の開口面形状のものとなっている。理由はウィグラー区間においては両側にシンクロトン放射光が当たるといこと、またアーク部においてはリング内側のアンテチェンバー部に非蒸発型ゲッターポンプを挿入し排気作用を持たせるとい計画があるためである。フランジ材質は SUS 316 と以前と同じであるが、厚さは 30 mm に変更した。

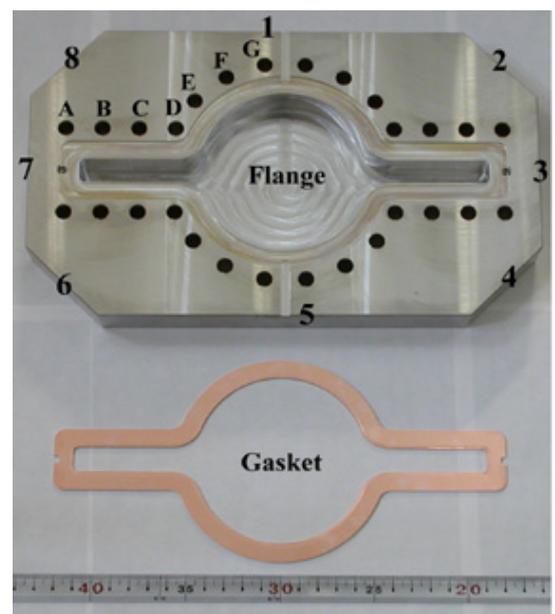


Fig. 19 実機用フランジおよびガスケット

ボルト穴の配置に関しては、ボルト穴 A の位置を変更することにより更に良好な歪み量・圧縮応力結果が構造解析から得られたので最終的に Fig. 19 に示すような配置とした。ガスケット材質、真空シール方式、シール幅等の変更は行っていない。

4. 2 実機用フランジでの試験

両側にアンテチェンバー部を持ったフランジに関して、試作フランジ同様の試験を幾つか行った。

4.2.1 リーク試験

ボルトの締め付けトルクとリーク量の関係を調べた。測定は3回行ったが Fig. 20 に示すようにいずれも試作フランジより少ない締め付けトルク (16 Nm) で He リークディテクターの最高検出感度($1 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)以下となった。このときの線平均圧縮応力は約 $350 \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 、ボルト当りの軸力は約 7.5 kN であった。

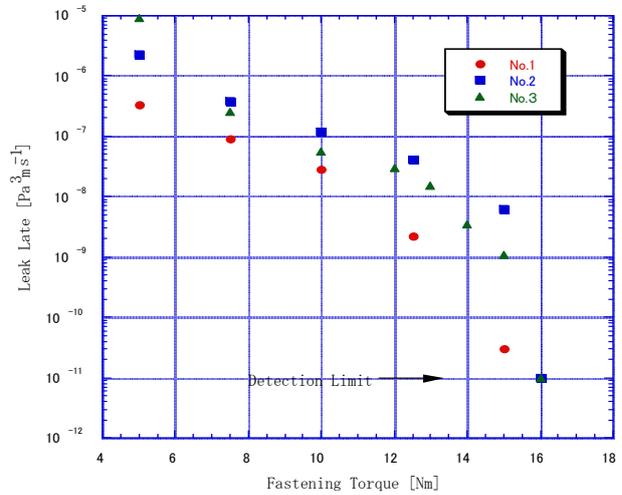


Fig. 20 締め付けトルクとリーク量の関係

4.2.2 ギャップ測定試験

リーク試験と並行して各締め付けトルクにおけるフランジ間の距離を、隙間ゲージを用いて測定した。測定結果を Fig.21 に示す。以前のように Position 2～4 部にかけての歪み量が大きくなることも無く、全体的にはほぼ均一な隙間となることが確認できた。また試作フランジに比べより少ない締め付けトルクで隙間がなくなることがわかった。

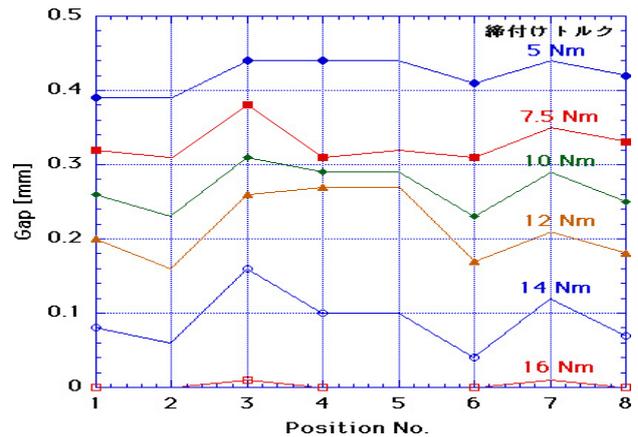


Fig. 21 各締め付けトルクにおけるフランジ間ギャップ

4. 3 ビームダクトへの適用

今回のフランジを使用し、KEKB LER (陽電子リング) 用ビームダクトおよびベローズチェンバーを製作し、実際に加速器リング内に設置した。



Fig. 22 リングに設置したビームダクト(左)とベローズチェンバー (右)

設置したビームダクトとベローズチェンバーを Fig. 22 に示す。

現在までに KEKB LER (陽電子リング) に 10 本程度の MO 型フランジ真空ダクトを設置し、数年間が経過しているが現在のところ特に問題は起こっていない。

5. まとめ

今回、導波管用 MO 型フランジを、非対称性の大きい複雑な開口面を持つビームダクトに応用するための開発研究を行った。円形と四角形を組み合わせたアンテナチェンバー付きビームダクト形状のフランジでは ~ 16 Nm の締付けトルクで良好な真空シール性能が得られた。250°C のベーキングでも問題は無かった。また、5 mrad 程度のねじれがフランジ間にある場合でも対応可能であることが確認できた。数種の試験、最適化の後、実機用ビームダクトやベローズチェンバーのフランジに採用した。現状国内最高の 1.7 A ビーム (1389 バンチ、バンチ長 ~ 7 mm) まで問題なく使用できることが確認された。今後の KEK-B 真空システムアップグレード時にはこのフランジを採用する予定である。今回の性能試験から MO 型フランジは加速器ビームダクトだけでなく、一般の複雑な開口面を持つフランジにも適用可能であると考えられる。今後も銅製のビームダクトに対応した銅合金製のフランジを製作するなどして更に試験を続けていく予定である。

6. 謝辞

本研究にあたり、高エネルギー加速器研究施設 末次 祐介 准教授には研究全般にわたりご指導、ご助言をいただきました。金澤 健一 教授、松本 浩 教授、および柿原 和久 技師には大変貴重なご意見をいただきました。また、MO 型フランジ製作に関しては、(株) オオツカ、大塚 美智夫氏に御協力をいただきました。ここに深謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu, M. Shirai and M. Ohtsuka, APPLICATION OF MO-TYPE GAPLESS FLANGE TO BEAM DUCT FOR HIGH CURRENT ACCELERATORS. 第 45 回真空に関する連合講演会、Oct.27,2004.
- [2] Y. Suetsugu, M. Shirai and M. Ohtsuka, "Application of MO-type Vacuum Flange to Beam Duct for High-Current Accelerators", J. Vac. Sci. Technol.A, Vol.23, No.6 (2005) 1721.
- [3] H. Matsumoto and M. Ohtsuka, Development of the Vacuum Flange for the High Power RF Applications, proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, Jul.7-9, p.271, 1999.
- [4] K. Kakihara, T. Ohgoe, M. Ikeda, T. Kamitani, S. Yamaguchi, T. Sugimura and T. Ohsawa, C-band 矩形導波管用フランジの検討, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30-Aug. 1, p.294, 2003.

長尺ビームダクト用窒素化チタン(TiN)コーティング装置の開発

加速器研究施設 第二研究系 久松 広美、KEKB真空グループ

1 はじめに

現在、KEKBでは電子、陽電子衝突実験をおこなっている。陽電子リングでは、銅チェンバからの二次電子によってビームに悪影響を与えている。この二次電子低減にはチェンバ内表面にTiN膜を施すことが有効であることが報告されている¹⁾。本報告はこのTiN膜を作成するためのシステムを構築するまでの経過と結果をしめすものである。手順として

- 1) 論文などで調査する。テスト装置でテストピースにTiN膜を作成し二次電子放出率(SEY)を測定し作成パラメータを決定する。
- 2) テストチェンバ(3.6m)にTiN膜を作成し、KEKBに設置し効果を調べる。
- 3) LER用全アンテチェンバ(合計チェンバ長約3km、Bチェンバを含む)のTiN膜作成システム設計

2 TiN膜作成方法

TiN膜作成方法として、蒸着、グロー放電、DCマグネトロン放電型があるが、作成時間、膜性質からDCマグネトロン型を採用した。図1にマグネトロン型の原理を示し、以下に概略計算と膜作成条件をしめす。

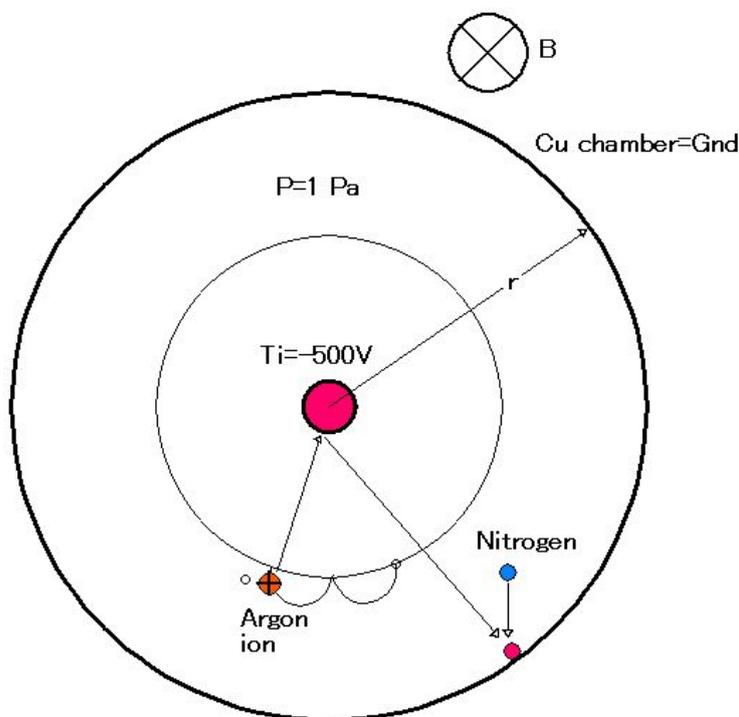


図1 マグネトロン放電によるTiN膜作成原理

半径 r を 5 [cm]、長さ 1 cm 当たりのイオン放電電流 I を 2 [mA]、アルゴンのスパッタ

リング収率 α を 0.3 とすればチェンバ内面への単位表面積当たりのチタン原子入射数 N は

$$N = \frac{\alpha I}{2r\pi q} = \frac{0.3 \times 2 \times 10^{-3}}{2 \times 5 \times 3.14 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 8 \times 10^{13} [\text{atoms} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}] \text{-- (1)}$$

となる。1 cm² 当たりの単原子層の密度は 1×10^{15} なので単原子層作成時間は約 14 秒となる。窒素のチェンバ表面への入射数 N_g は、圧力を P を 1 [Pa]、窒素の平均速度を 4×10^4 cm/sec とすれば

$$N_g = \frac{n\bar{v}}{4} = \frac{2.67 \times 10^{14} \times 4 \times 10^4}{4} = 2.7 \times 10^{18} [\text{molecules} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}] \text{-- (2)}$$

となる。チタン表面への窒素入射時の付着確率は 0.1 なので上記計算条件ではチタン原子がチェンバ表面について短時間に窒化チタンになる。

膜厚 はく離 膜作成時の内部応力、SR入射、抵抗 (TiNは銅の100倍)

を考慮して 0.2~0.4 μm (約1000原子層) 作成時間は (1式) から 約4時間

前処理 ベーキング、スパッタリング (表面洗浄) ?

緩衝用密着膜作成 (Ti 20 nm) 半導体作成分野で有効との報告²⁾

ガス アルゴン分圧、窒素分圧、ガス純度 (-80°C 0.5 ppm) 容易さから

窒素分圧を上昇させると、TiN膜は銀白色(main Ti)から金色(Ti+TiN[111])そして暗褐色に変化し、SEYは減少する報告がある。

Ti 純度 2種使用 鉄 0.15%、酸素 0.15%

3 二次電子放出率 (SEY) の測定原理

SEY測定原理を図2に示す。SEYは

$$SEY = \frac{I_r}{I_b} = \frac{I_r}{I_r - I_i}$$

なので I_i と I_r を測定し計算から求める。 I_b は、電子衝撃によって衝撃部分の温度上昇がないように数nA等数百nAとした、電子の最大エネルギーは2keVである。電子衝撃によるガス放出のガス分析をおこなうためマスフィルターを取り付けた。

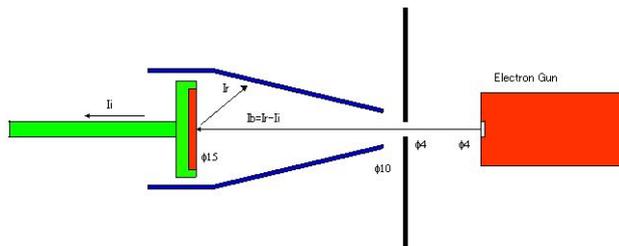


図2 SEYの測定原理

4 テストピースによる各種材料のSEY測定結果

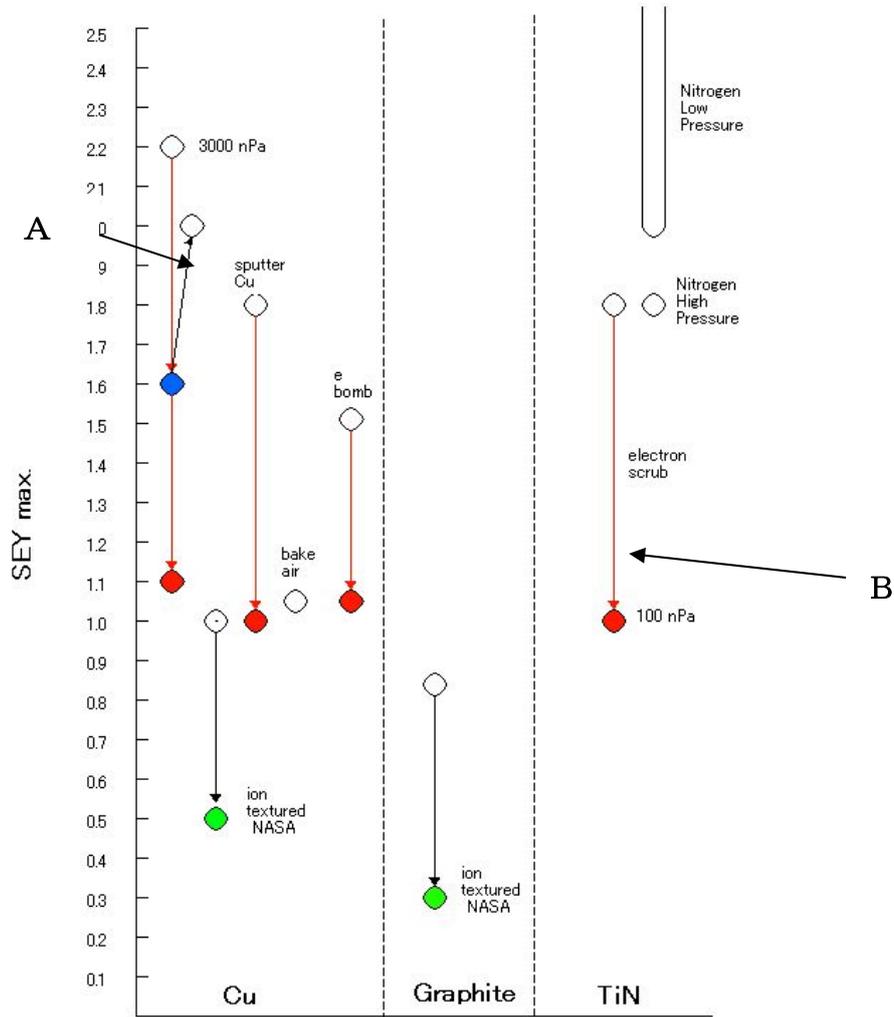


図3 各種材料の最大SEYの比較表

図に各種材料の最大SEYの比較、実験結果と論文（緑色）をしめす。赤線は電子衝撃を表す。電子衝撃中と後のSEY変化（図3A、B部）を図4、5に示す。

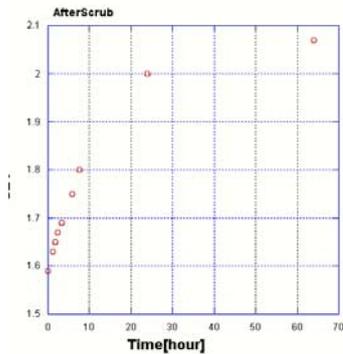


図4 電子衝撃後のSEYの様子

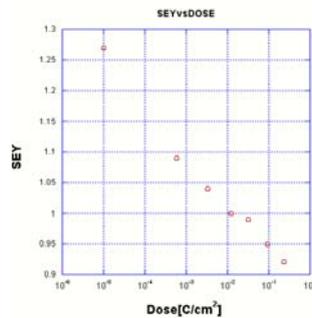


図5 電子衝撃によるSEYの変化

図3, 4, 5からSEYの測定は 10^{-8} Pa台の圧力下でおこなわないと、膜本質のSEYでなく、表面に付着した吸着ガスの影響が大きいことがわかった。図3にしめしたTiN膜の測定後測定圧力を 10^{-8} Pa台にして、電子衝撃後SEYが0.9まで下がった作成条件を以下に示す。

- アルゴン圧力 2.2Pa
- 窒素圧力 0.5Pa
- 磁場 16mT
- ベーキング温度 130°C(密着力から)
- 膜厚成長速度 0.08 Å/sec

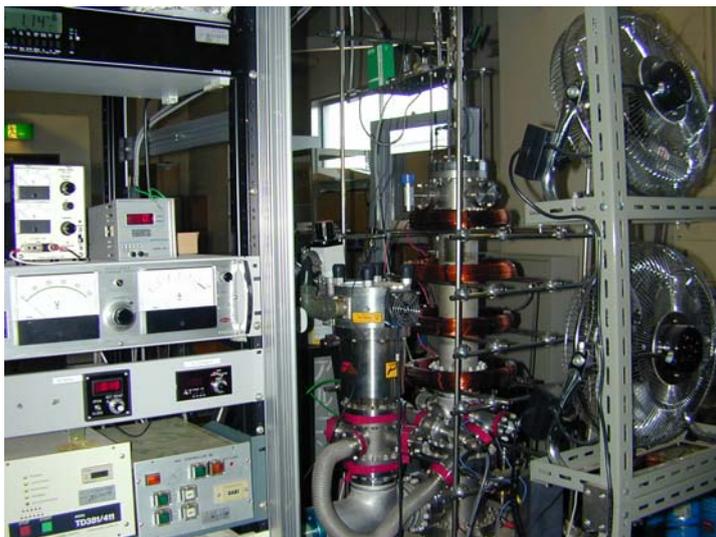


図6 テストピース作成装置

図6に上記実験で用いたテストピース作成装置を示す、

5 長尺ビームダクト用 TiNコーティング装置

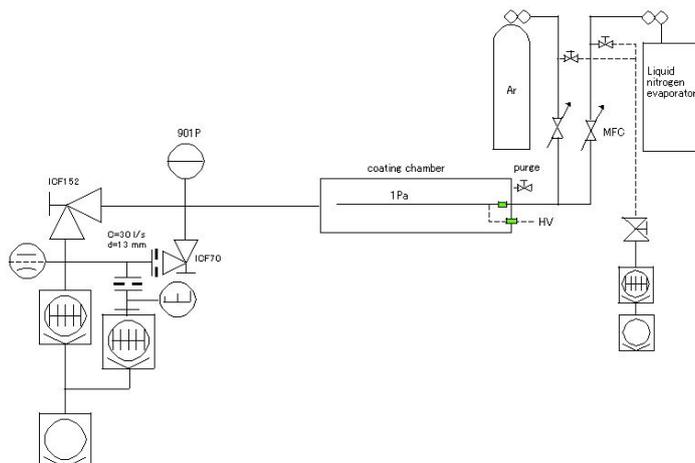


図7 排気装置

図7に排気装置の概略をしめす。排気系に求められる性能として、到達真空度 10^{-6} Pa台、ガス導入時TMPヘッド圧力 10^{-2} Pa台（TMP連続運転可能圧力）にする必要がある。ガス圧力を一定にするため排気速度から20SCCMの窒素、アルゴンマスフローコントローラーを使用する。圧力監視のため精度が高い絶対圧力計MKS社製901を用い、ガス組成分析のため差動排気付き残留ガス分析系を使用した。

長尺（3.6m）の薄膜作成は16mTの磁場作成装置は1mのコイルをエレベーター（5.6m移動）で上下に移動しておこなった。図8にTiNコーティング装置全景を示す。

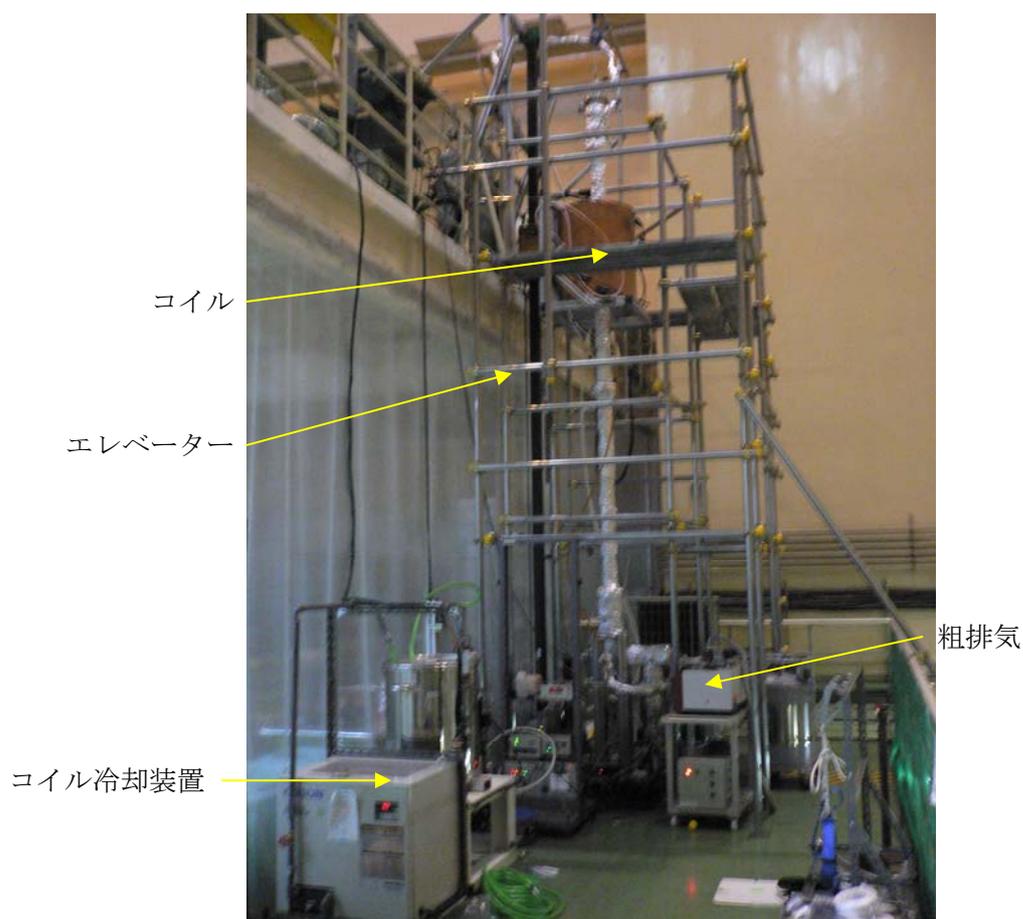


図8 TiNコーティング装置全景

6 まとめと今後の課題

目標であった低SEY(0.9)のTiN薄膜を作成できるようになった(ただしベーキングと電子衝撃後)。

現在、量産化システムにむけての実験と以下の考慮をおこない量産化の設計中である。

1)現在チタンパイプの温度上昇による変形で放電電流の上限が決まっているので、チタンパイプを水冷する、下部の径方向を拘束する方法に変更する。

- 2) 薄膜生成後、粗さ係数の上昇(数倍)し、到達圧力が高いのでベーキングが必要か？
BチェンバへのTiN(曲率半径約15m)は横に設置し、チタンパイプ支持方法を変更する
- 3) 表面の吸着物(水)のSEYに与える影響の解明として二次電子エネルギースペクトルを測定できるようにする

7 謝辞

本装置で使用したコイルを作成していただいた工作センター、磁場計算のためのプログラムを使用させていただいたKEKB-BTグループ、推薦していただいた金澤健一教授に感謝申し上げます。

8 参考文献

- 1) Secondary electron emission yields from PEP-II accelerator materials.
R. E. Kirby ,F. K. King, SLAC-PUB=8212
- 2) 沖電気研究開発 2000年10月 第184号 Vol. 67 No. 3 p65

4GHz 10bit ADC モジュールの開発

池野正弘

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所、エレクトロニクスシステムグループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

近年の高輝度・高強度のビームを用いた物理実験計測で必要とされる高速波形記憶型アナログデジタル変換回路(FADC)を開発した。KEK-VME 規格 6U シングルハイトのモジュールに 2GHz サンプリングで、メモリー長 16k ビットの FADC2 チャンネル分を実装しており、2GHz 10bit の IC 2 個をインターリーブすることで 4GHz の高速サンプリングと 10bit の高精度を実現した。要求に応じて 2GHz 2 チャンネルとしても使用可能である。

また、このモジュールを開発するに当たり、デバッグ用計測器である、サンプリングオシロスコープの外部トリガー信号を分周して供給するための 4GHz プログラマブルディバイダーを製作して開発を進めた。ここに合わせて解説する。

1. はじめに

1970 年代中ごろより、高速にアナログ信号をデジタル信号化する方式の IC (集積回路)として、FADC (Flash type Analog to Digital Converter) が市場で販売されるようになった。

初めは 25MHz ほどの変換速度であったが、100MHz、200MHz と年々スピードを上げ、現在は、単一の市販 IC としては 3GHz 8bit のものまで進歩してきている。

私もその進歩に合わせて、100MHz、250MHz、500MHz の CAMAC 規格あるいは VME 規格のモジュールを開発して高エネルギー物理学実験に供してきた。^{[1],[2]}

今回は、今まで経験のない高速であり、また高精度な現在購入できる最高性能の IC を使って開発することを決めた。これには、このような高性能な IC を使いこなす技術を習得するという意味合いが強くある。

2. モジュール仕様

KEK-VME 規格 6U シングルハイトのモジュールである。

KEK-VME 規格とは、サブラックのスロット 1 は J1 と J2 に VME64x 仕様の 160 ピンコネクタを持ち、スロット 2 からスロット 21 までの J0 部分に標準 VME で用意されていない +3.3V、-3.3V、-5V の電源ピンと 7 対の差動信号線及び 2 本のオープンコレクタ一駆動線を持つ 95 ピン (シールド除く) コネクタを装備した、KEK で開発した VME

の規格である。J0 コネクタのピン配置を表 1 に示す。

フロントパネルには、START、STOP 及び RESET の高速 NIM 規格入力 LEMO コネクタと、内蔵 2GHz クロックオシレーター出力ならびにクロック入力の SMA 型コネクタと、2 チャネル分の差動入力の SMA コネクタを装備している。

これら全てのコネクタの入力及び出力インピーダンスは 50 オームである。

データ記録用メモリの容量は 1ADC 当たり 16K×10bit であり、記録時間にすると、8 マイクロ秒である。

使用電圧は+5V、-5V、+3.3V、-3.3V の 4 種類で、消費電力は約 30W である。

Pos.	z	a	b	c	d	e	f
1	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
2	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
3	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
4	GND	+3.3V	+3.3V	+3.3V	+3.3V	+3.3V	GND
5	GND	+3.3V	+3.3V	+3.3V	+3.3V	+3.3V	GND
6	GND	+3.3V	+3.3V	+3.3V	+3.3V	+3.3V	GND
7	GND	+3.3V	+3.3V	GND	GND	GND	GND
8	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
9	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
10	GND	GND	GND	GND	-3.3V	-3.3V	GND
11	GND	-3.3V	-3.3V	-3.3V	-3.3V	-3.3V	GND
12	GND	-3.3V	-3.3V	-3.3V	-3.3V	-3.3V	GND
13	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
14	GND	-5V	-5V	-5V	-5V	-5V	GND
15	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
16	GND	S1+ (SYSCLK+)	S1- (SYSCLK-)	GND	S2+ (TRG+)	S2- (TRG-)	GND
17	GND	S3+ (GATE+)	S3- (GATE-)	GND	S4+ (CLR+)	S4- (CLR-)	GND
18	GND	S5+ (TAG0+)	S5- (TAG0-)	GND	S6+ (TAG1+)	S6- (TAG1-)	GND
19	GND	S7+ (TAG2+)	S7- (TAG2-)	GND	C1 (BSY/)	C2 (WOR/)	GND

Specific mane definition of LVDS S1 – S7 lines, and Open Collector Signal C1 and C2 lines

S1: System Clock (SYSCLK), S2: Trigger (TRG), S3: Gate (GATE), S4: Fast clear/Abort/Init (CLR)

S5: EventTAG0 (TAG0), S6: EventTAG1 (TAG1), S7: EventTAG2 (TAG2),

C1: BUSY/ (BSY/), C2: WOR/ (WOR/)

表 1 KEK VME J0 Pin 配置

2.1 仕様書

●入力信号

スタート (START) 入力信号

(NIMファースト負信号, 入力インピーダンス 50 Ω, LEMO型コネクタ×1)

ストップ (STOP) 入力信号

(NIMファースト負信号, 入力インピーダンス 50 Ω, LEMO型コネクタ×1)

リセット (RESET) 入力信号

(NIMファースト負信号, 入力インピーダンス 50 Ω, LEMO型コネクタ×1)

アナログ入力信号

(フルスケール 250mV(差動モード), 入力インピーダンス 50Ω,
入力レンジ -125mV~+125mV(差動モード), SMA型コネクタ)

●クロック入出力信号

出力 (CLOCK OUT) 信号

2GHz 550mVP-P以上 ACカップル

入力 (CLOCK IN) 信号

200MHz~2GHz 入力インピーダンス 50Ω ACカップル 150mVP-P以上
(内部CLOCKにて動作させる場合 パネル面のコネクタを短いSMAケーブルで接続)

●VME Space Address Map

Address (HEX)		D31-D26	D25-----D16	D15----D10	D9-----D0
X+000	Data	未使用	MSB LSB	D10~D13	MSB LSB
			CH0 N+1~N+16383	未使用	CH0 N~N+16382
X+0fc				D14 Empty	
X+100				D15 Full	
			CH1 N+1~N+16383		CH1 N~N+16382
X+1fc	Data				
X+200	CSR	未使用			CSR

X=Base Address (A10~A23 jumper selectable)

●CSR (X+200) Bit Assignment

Bit	Contents	READ/WRITE
0	RESET	WRITE
1	START	WRITE
2	STOP	WRITE
3	FULL FLAG CH0	READ
4	EMPTY FLAG CH0	READ
5	FULL FLAG CH1	READ
6	EMPTY FLAG CH1	READ
7	RUN (AD変換中)	READ

●電源・外形

電源 : +5V 530mA、-5V 3.1A、
+3.3V 3.24A、-3.3V 200mA

消費電力 : 29.5W

形状 : ダブルハイトVME 1幅ボード (6U) ; 160×233.35(mm)

3. 設計

3.1 回路構成

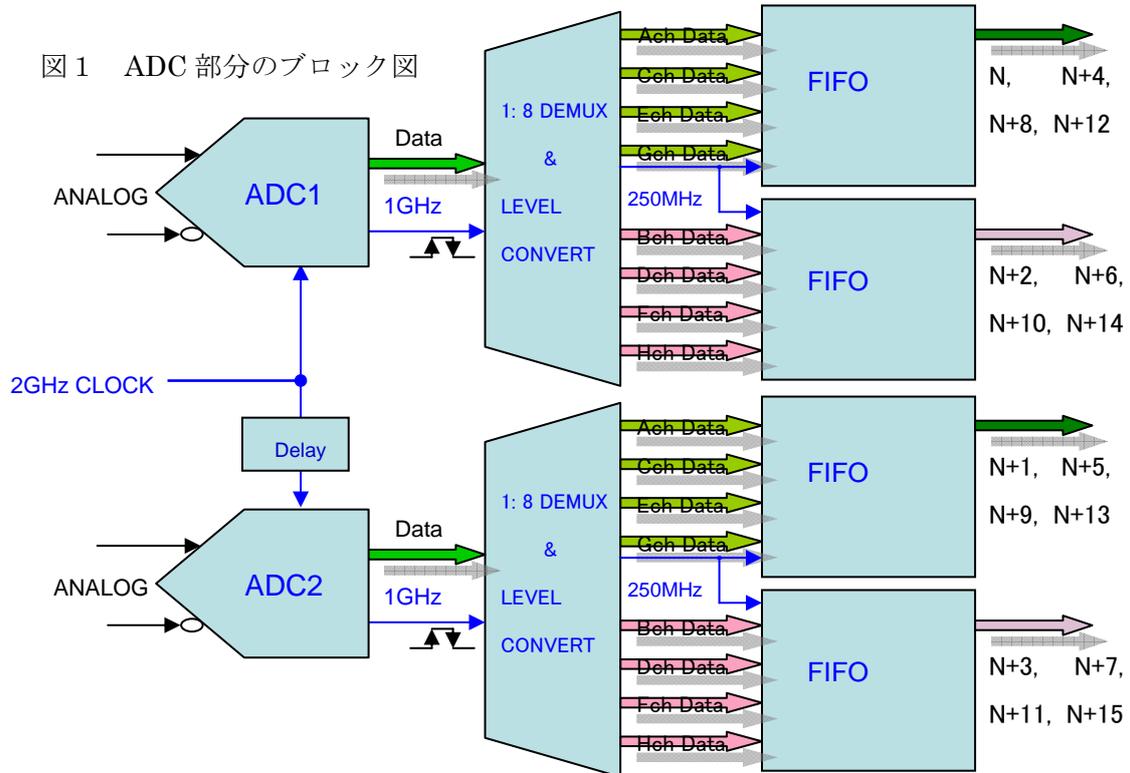


図1のように2つの2GHz 10bit ADC(Atmel社 TS83102G0BCGL)の一方に500ピコ秒のディレイを入れて交互に使用し4GHzサンプリングを行う。それぞれのADCから2GbpsのECL(Emitter Coupled Logic)レベルのデータストリームが出力される。同時に1GHzのタイミングクロックが出力され、その両エッジを使って次段の1対8マルチプレクサー(Atmel社 TS81102G0CTP)に入力され、250Mbpsの8系列の2.5VCMOSレベルに変換されたデータ列に時分割される。ここでマルチプレクサーを使用するのは2Gbpsで動作するメモリーが存在しないからである。8系列の250MbpsデータはFIFOメモリー(IDT社 IDT72T4088L4BB)に格納されVME Bus経由で読み出される。

差動のアナログ入力は片側を50オーム抵抗でグラウンドに繋ぐことにより、シングルエンド入力として使用できる。また、4GHzサンプリング時は外部でシグナルディバイダーを使用して両方のADCのアナログ入りに同信号を与える必要がある。

この図以外にクロック周辺回路と、VMEインターフェイスがあり、それら配置を写真1を使って示す。

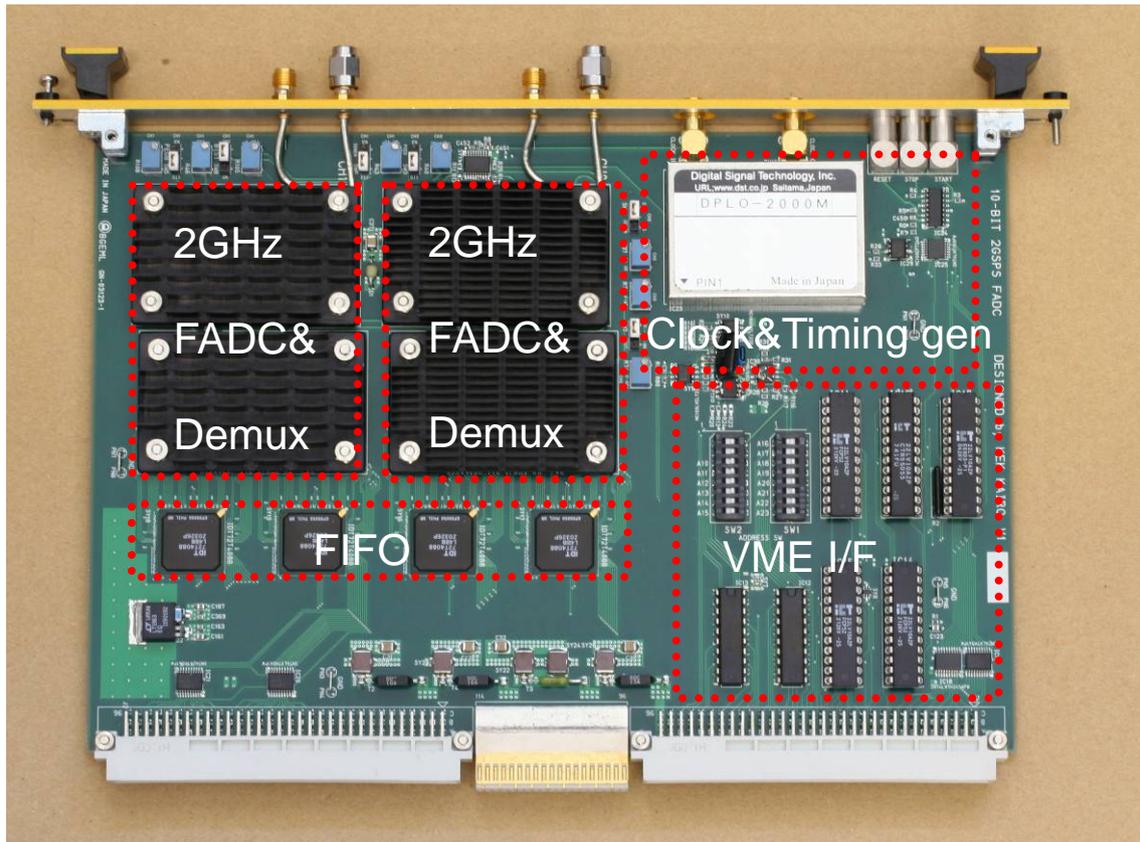


写真1 4GHz FADC 部品配置

3.2 プリント配線基板材料の選定

計測用電子回路のプリント基板として、FR-4（難燃ガラスエポキシ材）が一般的に使用されている。広い周波数特性、絶縁特性、加工性、などに優れており低価格である。

しかし、1GHz以上での使用を考えると、比誘電率の高さとその高周波特性の悪さ及び誘電正接の高さが問題となってきて、正確な信号伝送のためには、より低誘電率で低誘電正接なレジン系やテフロン系の基板材料の使用が考えられます。しかし特にテフロン系材料は加工性の問題や在庫と供給の問題等もあり値段も非常に高価です。また最近の環境対策でのノンハロゲン化のために入手製に不安があります。

そこで今回使用する基板材料の選定をどうするか？

特に考慮の必要な部分は、最高 3.5GHz のアナログ入力ラインと最高 2GHz のクロックラインである。アナログ入力ラインの信号の減衰は極力避けたいが、クロックラインは差動信号伝送であるしロジック信号のため 2 分の 1 程度の減衰は問題ない。

アナログ入力の配線のみ周波数特性の良いセミリジッドケーブルを使用することにすれば、安くて安定供給の FR-4 基板が使用できるため、そのように決定した。

今回ケーブルはセミリジッドケーブル相当のセミフレキシブルケーブルである、HUBER-SUHNER 社の SUCOFORM_86 を使用した。使用するその場で、治具無しで手

により成形できるため便利である。

3.3 基板設計

高速回路プリント基板の設計において一番重要なのは、部品配置設計である。高速回路に限ったことではないが、とりわけ高速回路では信号の流れをきれいにしないと回路の性能に影響し、最悪の場合では動作する、しないに係わる重要な部分である。

コネクタの位置等、限定される条件下で如何に信号が交差することなくスムーズに流れ、重要な部品間を最短距離で結ぶかを考える。また信号間クロストークを少なくする考慮も必要である。

部品配置設計以外では電源、グラウンドのインピーダンス下げることが重要である。そのためには、高速 IC の電源ピンごとに容量の違うバイパスコンデンサーを複数、ピンの間近くに配置する。また電源層、グラウンド層と繋ぐスルーホールは複数あける。こうすることで、広い周波数にわたってインピーダンスを下げる事が出来る。電源層とグラウンド層を隣どうしに配置し、その距離を狭く設定すると、非常に周波数特性の良いパスコンとなり、ノイズの低減に役立つ。

そのほか、信号配線はインピーダンスを制御して、適切に終端することが必要である。

本モジュールのプリント基板は 6 層構成である。

写真 2 と写真 3 にそれらの様子を示す。

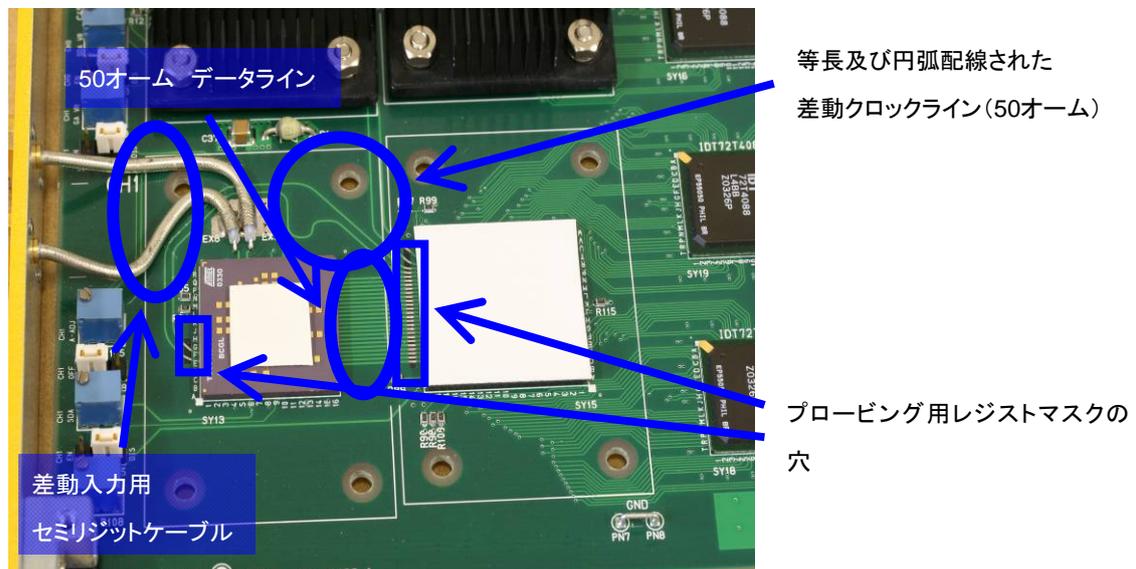


写真 2 配線の様子

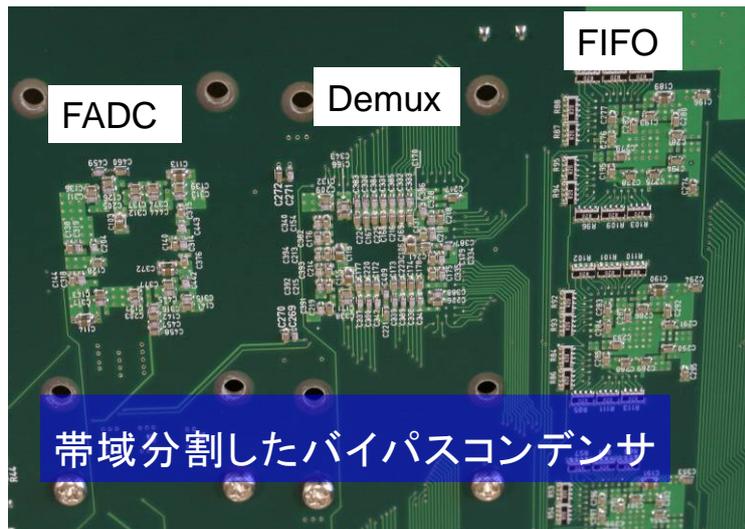


写真 3 配線の様子

3.4 配線のインピーダンス制御

プリント基板の信号配線のインピーダンス制御の構成はいくつもあるが、一般的によく使われるのが **Microstrip** と **Stripline** である。**Microstrip** は基板表面に信号線が露出しており、回路修正がしやすいため、ほとんどの場合この構成としている。

それぞれの構成にもシングルエンドと差動線路があり、それぞれの伝送路インピーダンス計算の近似式を図 2 に示す。

実際の設計では、いちいち手計算するのは面倒なため、

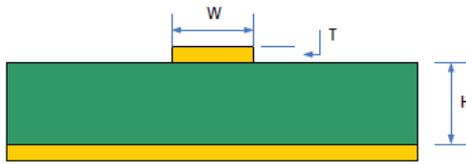
I-Laboratory の Home page にある Tool ソフトや Agilent 社の無料ソフト AppCAD や TDK 社の無料ソフト SEAT などを使用すると便利である。

しかしここで注意が必要なこととして、インピーダンス制御基板と銘打っていない普通の基板では、良くて 10% 誤差程度しか制御できないことである。

3.5 放熱設計

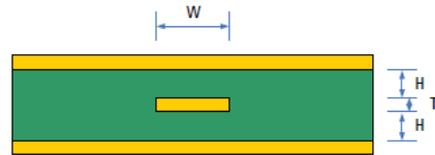
このモジュールで使用している半導体部品のうち、ADC とマルチプレクサーは非常に消費電力が多く、それぞれ 4.6W と 8.4W である。そのままでは高温になりすぎるためヒートシンクによる放熱が必要である。8.4W のマルチプレクサーを例に考える。データシートによると、使用する基板にもよるが、ヒートシンク無しで基板に実装した状態の IC の熱抵抗 θ_{j-a} は $13^{\circ}\text{C}/\text{W}$ と見積もられており、 50°C の大気中ではジャンクション温度は 159.2°C にもなりこわれてしまう。

Single-Ended Microstrip



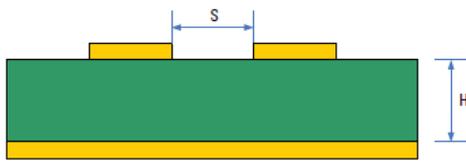
$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left[\frac{5.98H}{0.8W + T} \right]$$

Single-Ended Stripline



$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{1.9(2H + T)}{(0.8W + T)} \right]$$

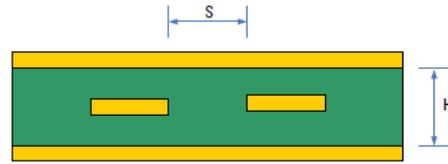
Edge-Coupled



Differential Microstrip

$$Z_{diff} = 2 \times Z_0 \times \left[1 - 0.48 \times e^{-0.96 \times \frac{S}{H}} \right]$$

Edge-Coupled



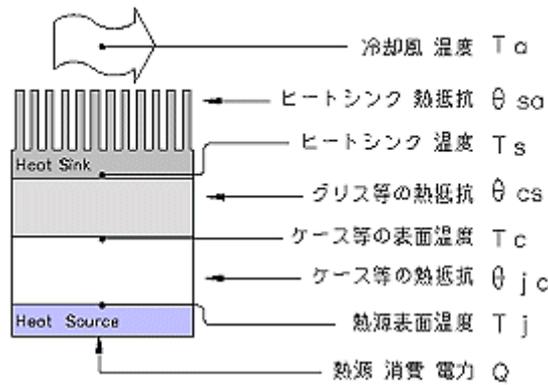
Differential Stripline

$$Z_{diff} = 2 \times Z_0 \times \left[1 - 0.347 e^{-2.9 \times \frac{S}{H}} \right]$$

- ϵ_r は絶縁体の比誘電率
- W が $2H$ 以下の条件で誤差は最大 3%

図2 代表的な伝送路とインピーダンスの計算式

3.5.1 ヒートシンクの選定



$$Q = \frac{T_j - T_a}{\theta_{sa} + \theta_{jc} + \theta_{cs}} \quad [式1]$$

$$\theta_{sa} = \frac{T_j - T_a}{Q} - (\theta_{jc} + \theta_{cs}) \quad [式2]$$

求められる条件として

$$T_j \text{ MAX} = 90^\circ\text{C} \quad T_a \text{ MAX} = 50^\circ\text{C}$$

$$Q = 8.4\text{W} \quad \theta_{cs} = 1.5^\circ\text{C/W}$$

$$\theta_{jc} = 1.5^\circ\text{C/W}$$

とすると

ヒートシンクの熱抵抗は[式2]より

$$\theta_{sa} = (90 - 50) / 8.4 - (1.5 + 1.5) = 1.76^\circ\text{C/W}$$

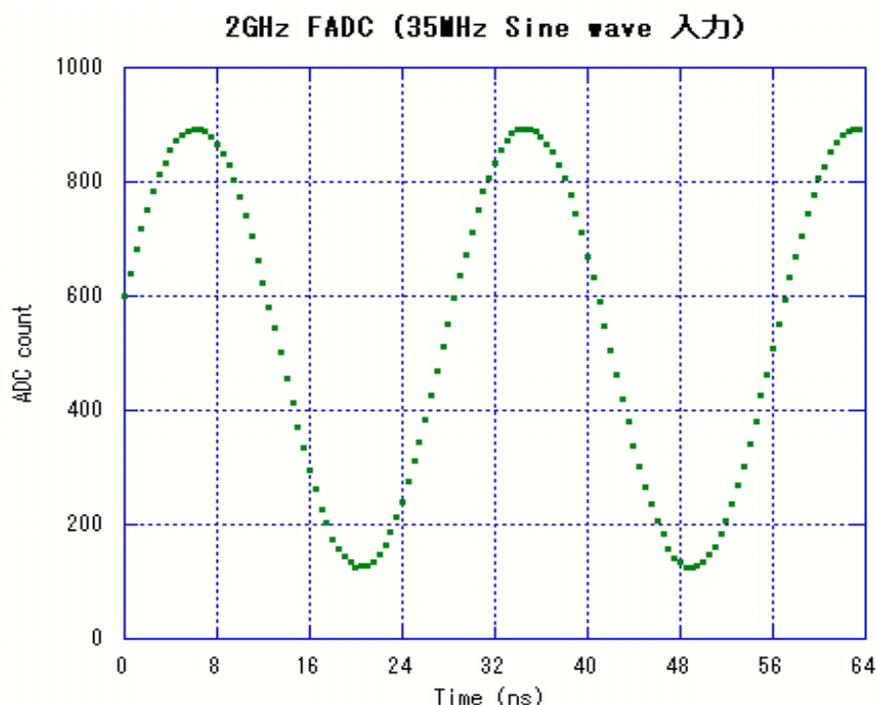
となる。ファンによる強制冷却が期待できるので、風速 1.6m/sec 時の熱抵抗が 1.8°C/W である、Alpha 社のヒートシンク DCC3758U-11B を選定した。

4. 動作検証

クロック信号として 2GHz を入力する。差動アナログ入力の -VIN を 50 オームで GND に終端することでシングルエンドとし、+VIN へ 35MHz 380mVp-p のサイン波を入力して VME 経由で読み出したデータのプロットを図3に示す。

市販のオシロスコープで同じ波形を計測したものと比較して、当モジュールの ADC は 10bit 精度であることから、より滑らかな波形となっている。

図3 2GHz サンプリングの例



次に、クロックは同じく 2GHz で、2 チャンネルをインターリーブ使用として 4GHz サンプリング相当でパルス波形を計測した時のプロットを図4に示す。

この時両チャンネルのアナログ入力には、外部ディバイダーを通して同じ波形を入力した。

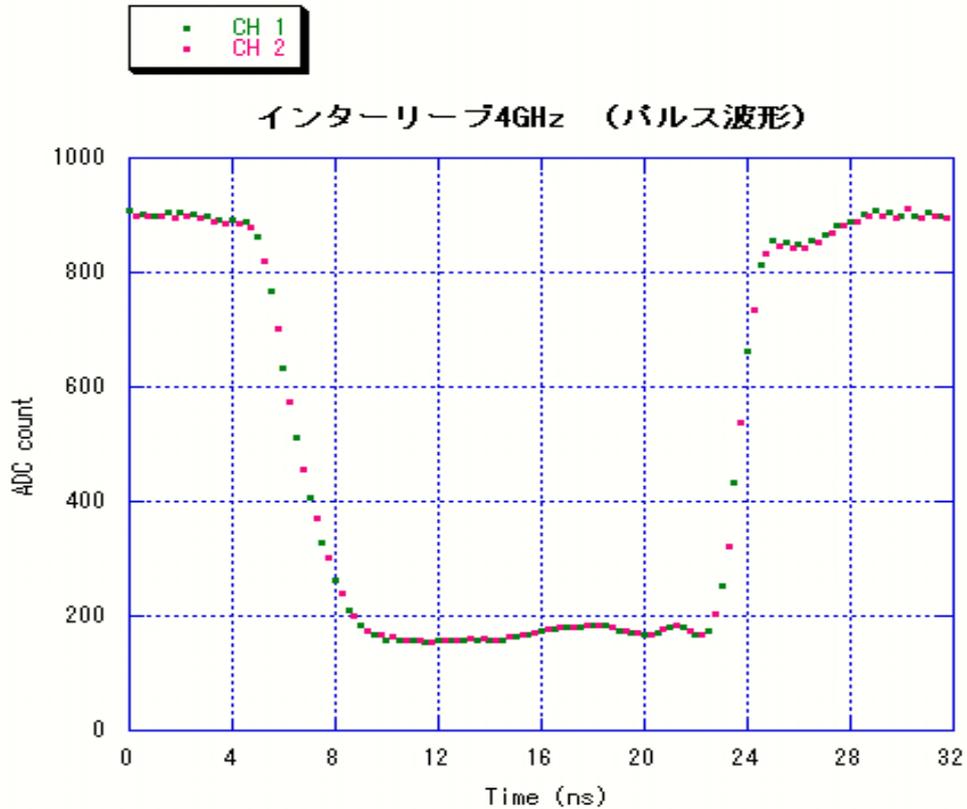


図4 4GHz サンプリングの例

5. 測定治具

電気信号の波形観測に用いられる計測器で、最も一般的で頻繁に用いられるのが、オシロスコープである。本モジュールの開発、デバッグに於いてもオシロスコープは主となる計測器である。しかし、本モジュールの基本クロックは 2GHz であり、また使用している ADC IC のアナログ入力の最高周波数帯域は 3.5GHz である。

一般的に必要とされるオシロスコープのアナログ帯域は、観測対象信号の帯域の 3 倍から 5 倍と言われている。それは基本波の 3 倍あるいは 5 倍の高調波成分まで観測しないとクロック等の矩形波を、正確には観測できないためである。

このことを本モジュールに当てはめると、オシロスコープの帯域として 10GHz 以上が必要となる。2008 年現在はこういう高性能 (アナログ周波数帯域 20GHz) なオシロスコープが開発され、販売されているが、本モジュール開発時である 4 年前は存在しなかったし、価格も非常に高価であるため、現在でもサンプリングオシロスコープという、繰り返し信号のみ観測できる物を使用するのが一般的である。またこの種の計測器であれば現在、100GHz の帯域の物が販売されており、格段に高精度の計測が可能である。

今回使用した物は写真 4 の現 Agilent technologies 社 (購入当時 HP 社) の 20GHz アナログ周波数帯域のサンプリングオシロスコープである。

ただ、ひとつ困った問題がある。それはこの種のオシロスコープには外部トリガーしか

なく、波形計測のトリガーにシステムクロックを分割して使用するのだが、ADC の出力やマルチプレクサーの出力を観測する時に、多重トリガーとなってしまう、波形が重なってしまって正しく表示されないことである。

そこで今回、トリガー入力用の高速のプログラマブル分周器を市販品が無いため同時に開発した。写真5に開発したプログラマブル分周器を示す。

写真で見ると、3種類の分周器があり、最高4GHz入力1/2分周と最高2GHz入力1/4分周と最高1GHz入力1/2分周~1/16分周プログラマブルのものである。入出力のコネクターは全てSMA型を使用しており、配線はセミリジットケーブルを使用している。NIM1幅のモジュールに収めている。



写真4 20GHz帯域サンプリングオシロスコープ(上)と
単発信号用200GS/S相当4.5GHz帯域トランジェントディジタイザ(下)

まとめ

6U KEK VME 1幅モジュールに収めた、4GHz 10bit FADC を開発した。用途により2チャンネルの2GHz 10bit FADCとしても使用可能である。

開発のための測定治具である4GHzプログラマブル分周器も、NIM 1幅モジュールとして合わせて設計、製作して開発を進めた。このモジュール単体での用途もいろいろあるのではと思われる。

このFADCモジュールは、部品代だけでも非常に高価なもので、高エネルギー物理学実

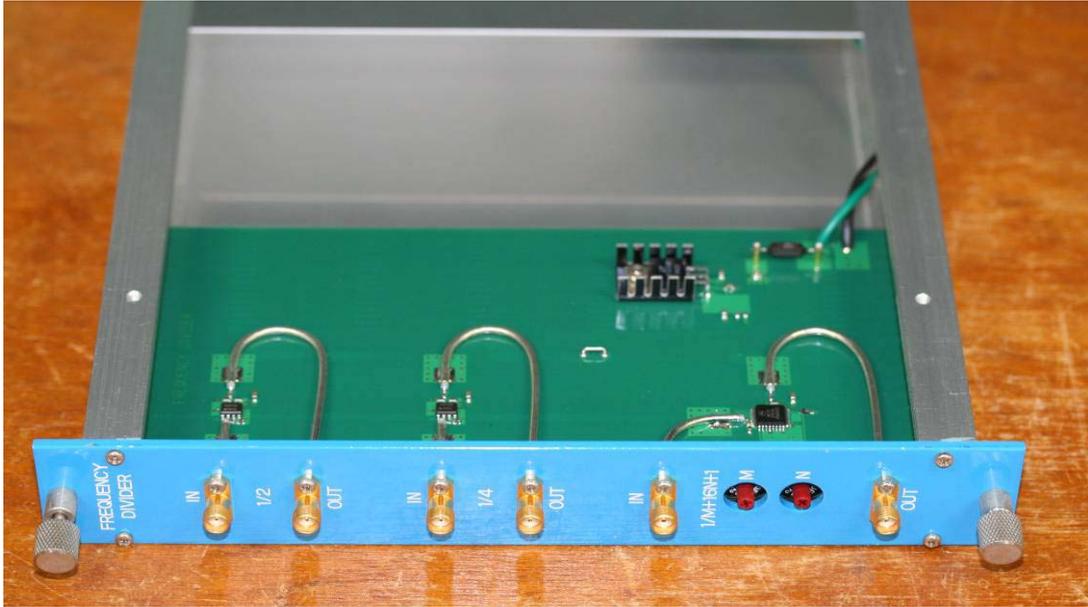


写真 5 測定治具として開発した 4GHz プログラマブルディバイダー

験の様な多チャンネルを必要とする用途には実用的でないが、この開発を通じて得られた経験は、今後の実用的超高速 FADC 開発及び超高速回路開発全般に生かされるものである。

6. 謝辞

本モジュールの開発において、プリント基板の製造に関しジー・エヌ・ディ社の宮沢氏には大変お世話になりました。心より感謝いたします。

参考文献

[1] Development of a readout electronic system for the VENUS vertex chamber
M. Morii, T. Taniguchi, M. Ikeno
KEK-INTERNAL-87-14. February, 1988

[2] デジタル波形処理によるシンチレーション検出器の波形弁別特性
松藤成弘 他
放射線 Vol. 19, No. 2 (1993)

[3] LVDS owners manual 4th edition
National Semiconductor

[4] Packaging of Atmel Data Conversion Circuits
Atmel application note

[5] ヒートシンク選択の手引き
株アルファ 技術資料

編集後記

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

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

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

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

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

平成20年6月
出版担当 人事労務課共済福祉係