

JLC X-BAND TECHNICAL NOTE

Fabrication of 60cm-long X-band HDS structure (KX01)

T. Higo, K. Bessho, Y. Funahashi, N. Higashi, Y. Higashi, H. Kawamata, N. Kudoh, T. Kume,
K. Takata, T. Takatomi, N. Toge, K. Ueno, and Y. Watanabe

* KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

A 60cm-long X-band structure was fabricated successfully. This structure design is similar to that for the actual GLC main linac one but detuned only, which means without HOM damping. Through this fabrication, we explored the following technical developments; (1) design of coupler, (2) cell fabrication and RF evaluation by a cell maker, (3) chemical etching of cells based on the SLAC recent procedure, (4) diffusion bonding in a hydrogen furnace, (5) coupler integration by gold brazing in a hydrogen furnace, (6) vacuum baking, (7) dimension measurement on relevant positions of the structure and (9) low-power measurement on RF properties and tuning. These results are described here so that our status of the fabrication of structures are reviewed.

60 cm X バンド HDS 加速管 (KX01) の製作

肥後寿泰、別所光太郎、舟橋義聖、東憲男、東保男、川又弘、工藤昇、久米達也、
高田耕治、高富俊和、峠暢一、上野健治、渡辺勇一

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
KEK、高エネルギー加速器研究機構

要旨

X バンドの 60cm 加速管を製作した。GLC の主線型加速器に用いる加速管の実機仕様と類似しているが、HOM はダンピングさせていない、いわゆる DS 構造の加速管である。この製作を通じて、下に掲げる項目に関する開発の立ち上げを行ったので、それらの主要技術：(1) 本体部の設計、(2) カプラーの設計、(3) 超精密加工によるセルのメーカーによる製作と基本 RF 評価、(4) SLAC で最近の通常加速管に採用されている化学エッチング処理によるセル洗浄、(5) 水素炉を用いた拡散接合、(6) 水素炉を用いた金ロウ付けによるカプラー等の接合、(7) 真空ベーキング、(8) 加速管各所の寸法精度、(9) RF 特性測定とチューニング等を本稿にまとめ、現在の加速管製作の現状を確認するとともに、これからの開発方針を考える材料とする。

1. 序

GLC 主線型加速器に用いる X バンド加速管は、現在まで KEK・SLAC の共同開発を行ってきている。現在では、TRC 答申に沿って、安定な高電界運転の可能な加速管を実証するため、主に KEK にてセルの製作を行い、SLAC にてカプラー製作、表面処理、組み立て、高電界試験等、その後の工程を殆ど行っている。GLC としては、これまでの GLC の基礎技術をベースにしながら、最近の共同開発で得られつつある必要な製作技術を取り入れて、加速管の全製作工程を経験し、改良していく必要があると考えている。

最近、工作センターを中心に、超精密加工セルと金ろう付けでの組み立てを経て 20cm 加速管を製作した[1]。この経験を生かして、現在の GLC の実機長である 60cm の加速管を製作することにし、最終 HDDS 加速管製作への最終ステップとしたいと考えた。これが手の中に収められれば、セルを HDDS タイプにすることと、HOM 引き出し部分の若干入り組んだロウ付けをクリアーして、GLC の最終目標に辿り着くことができる。これが本加速管の目的である。完成した加速管は、GLCTA (現 XTF) 試験設備で高電界試験を継続している。

2. 電気・機械 基本設計

2-1 本体部分設計

基本設計は、最近の GLC/NLC の高電界特性試験を鑑みて、最近まで GLC の基本設計として採用されていた H60VG3 型とした。基本パラメータを表 1 にリストした。有効加速長は 60cm で、入り口付近の群速度が光速の 3% 程度である。また、ビームホール径の平均は $a/\lambda=0.18$ である。

表 1 加速管基本パラメータ

パラメータ	説明	数値	単位	備考
Ls	加速管有効加速長	0.6	m	
セル	ディスクロード型	セル	53	カプラー含めず
a/λ	平均ビームホール径	0.18		
β_p	位相すすみ	$5\pi/6$		セルあたり
2a	ビームホール直径	10.8~8.2	mm	
v_g/c	群速度/光速	3.0~1.4	%	
τ	減衰定数	0.51		
T_f	充填時間	97	ns	
カプラー型	導波管型ダブルフィード			KEK 設計

参考のために、典型的なデザインパラメータを下記 Fig. 1~Fig. 4 にプロットした。これらは、SLAC の Z. Li 氏の計算によるものである。

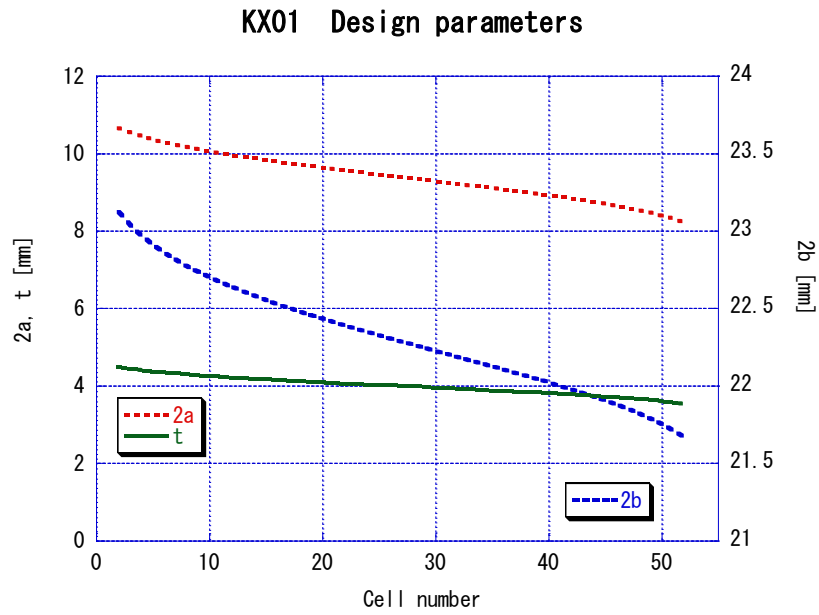


Fig. 1 Typical design dimensions.

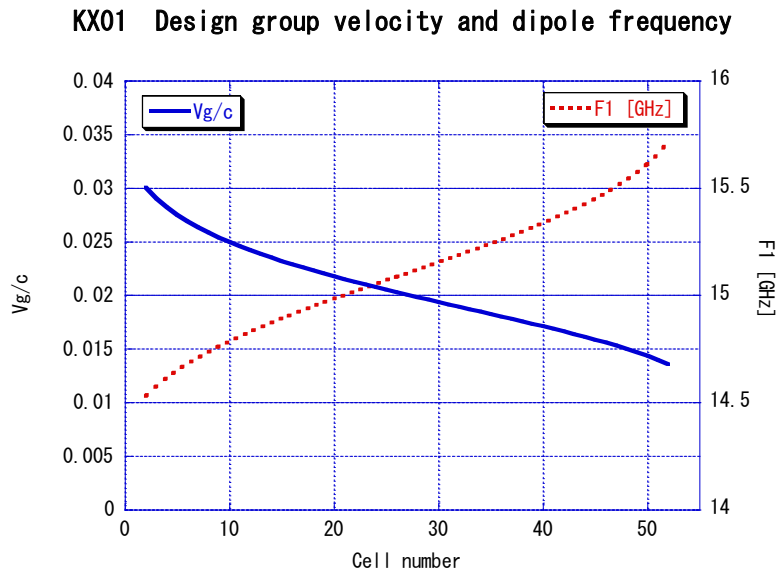


Fig. 2 Design dipole frequency and related group velocity of the accelerating mode.

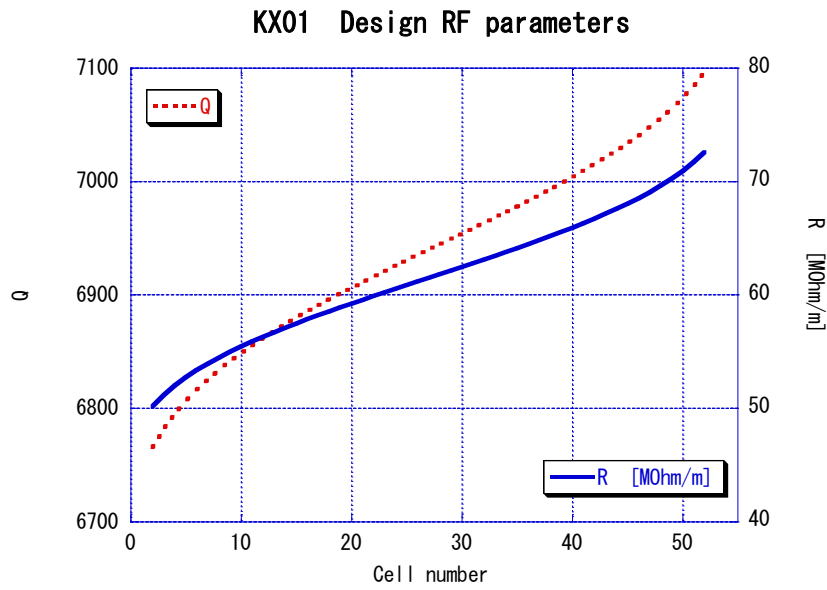


Fig. 3 Design RF parameters.

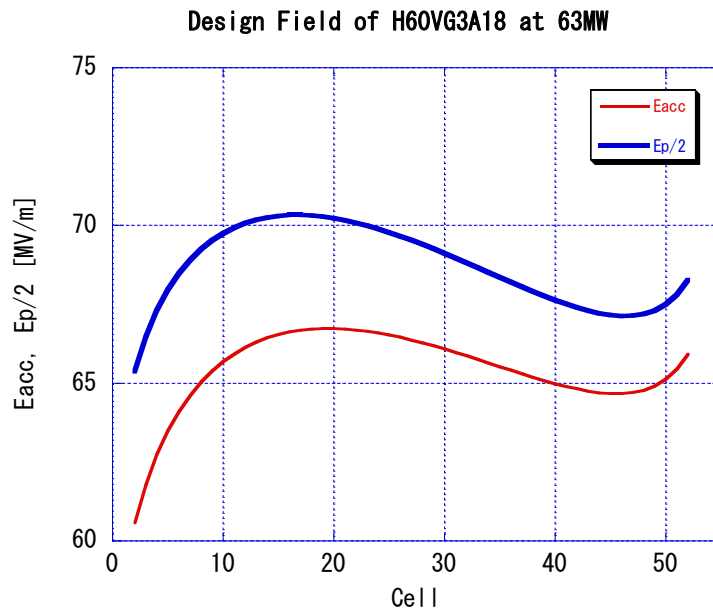


Fig. 4 Design accelerating field and surface field (x 1/2) to obtain 65MV/m in average with 63MW input power.

2-2 カプラー設計・確認

カプラーの構造には、これまで試験してきた加速管からの知見が生かされている。導波管との結合部分にアイリスを設ける場合はエッジ状の部分で電流の局所的増大を起こさないような配慮を行うこと、またそのようなアイリスを設けることなく、導波管から直接円筒導波管の TM01 モードに変換するタイプ（導波管型[2]やモードコンバータ型[3]）が考えられてきている。本加速管に対しては導波管型の設計を採用したが、カプラー部分の加速電界が低いことによる有効加速長が若干減少することを除けば、高い加速電界の実現可能性を見極めるために充分であり、構造上製作が単純であるという理由によっている。

電気設計は HFSS を用いて行った。カプラーセルと数セルを含む系を作り、セル側からマッチング用アイリスを通してカプラー側へ入力し、カプラーから反射してくる反射波を N. Kroll の方法[4]を用いて評価し、それを最小にするように最適化した[5]。調整パラメータは、§2-3 に掲げる Fig. 6 に示した配置から分かるように、導波管からカプラーへのアイリス径、マッチングセルの径及び長さを用いた。設計例を Fig. 5 に示した。ここでは、11429MHz でマッチングがとれる設計としたが、これは単に設計モデルが 20°C の値を採用していることによる。この図より、カップリングを左右するアイリス径の製作許容誤差は $\pm 10\mu\text{m}$ 程度、反射ベクトル位相に関連するマッチングセルの周波数を左右するセル直径の許容公差は $\pm 2\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。これらの許容公差は、超精密加工を基礎にする部品製作、組立技術により充分達成できる範囲にある。

この設計手法、最適化の妥当性は、テストカプラーとそれに続く数セル、その先にマッチング用アイリスを介して円錐状の吸収体を円筒導波管に装備したスライディングロードのセットアップで確認する。但し、カプラー側より入力しロード側からの反射が小さいことを確認した上で、反射特性の計算と実測の比較することにより行った。

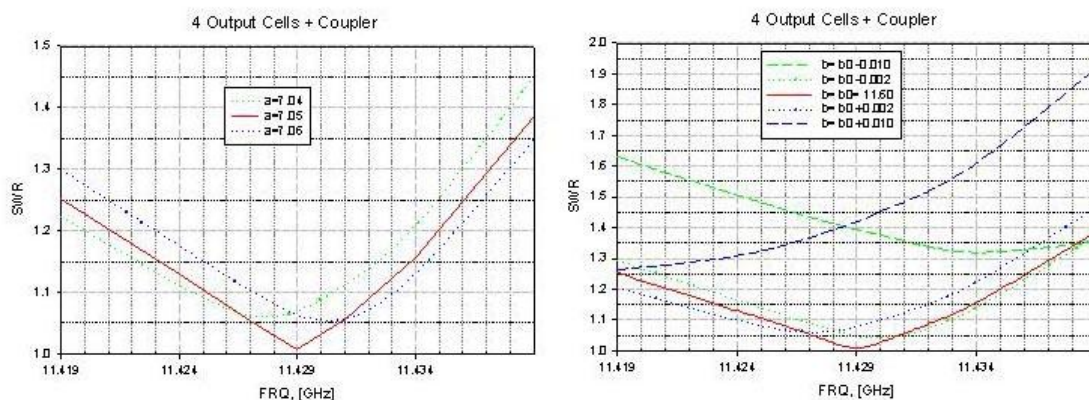


Fig. 5 Output coupler matching calculation.

2-3 加速管RF関連部分の配置と組立工程

加速管内部のセル形状に関する全体配置を Fig. 6 に示した。構成は、RF 入出力部に導波管型カップラー、その内側にインプット、アウトプット各々にマッチング用セル各 1 セルを介して、中央部にはレギュラーセル（# 2～# 5 2）を配置する。

組立はまずマッチングセルまで含めて、回転対称構造であり超精密旋盤加工で製作されるパーツを拡散接合により接合して本体部分を形成する。並行してカップラーブロックはイン/アウト独立に、U字型導波管形成パーツと蓋をロウ付けにて組み立てておく。本端部分とカップラー部分を最終ロウ付け工程で、50 μ mのシートロウを介して接合し完成となる。

完成後、各セルに具備してあるチューニング機構で、RF 計測結果を反映させるようにカップラーマッチング等のチューニングを行う。

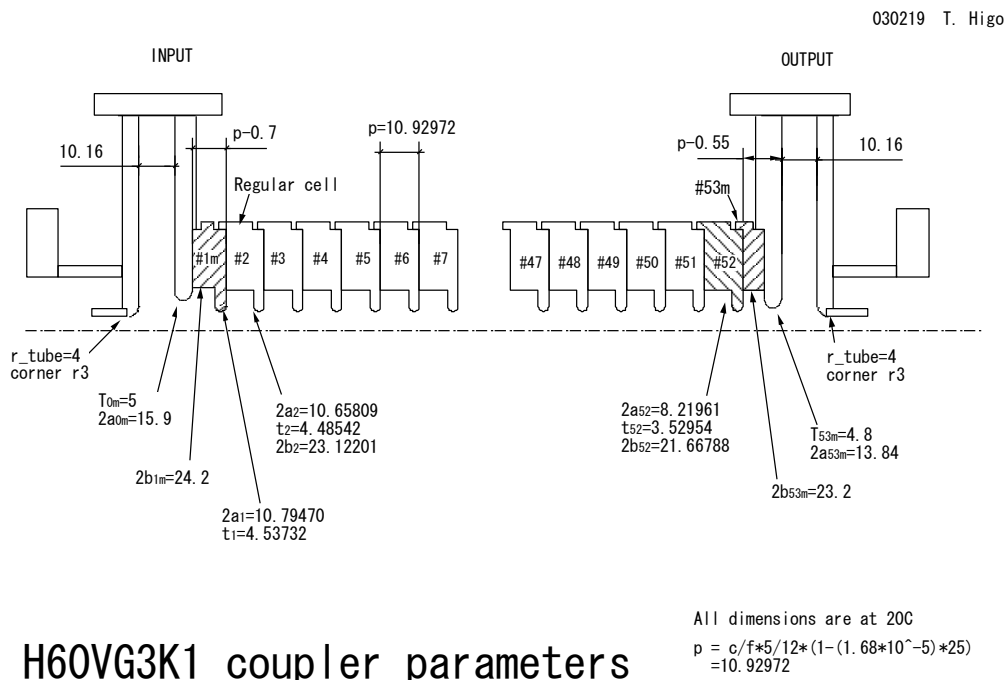


Fig. 6 KX01 configuration of RF related parts.

3. ディスク、カップラー パーツ製作

ディスク製作

ディスクの製作は、石川島播磨重工業にて、超精密加工で行った。加工後のRF評価もメーカーで行い、その結果を下記に示す。測定に用いたセットアップは Fig. 7 と等価なものである。

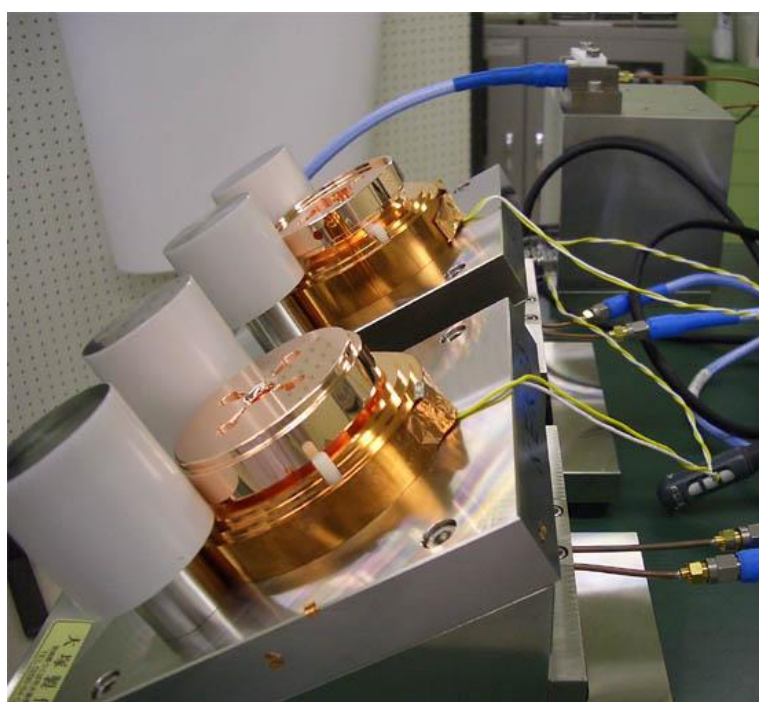


Fig. 7 Single-cell RF-QC setup.

単一セル RF 測定結果を Fig. 8 に示した。また、 F_1 (設計ダイポールモード周波数)の関数として、2次関数によるスムーズフィットからのずれを Fig. 9 に示す。これらから、レギュラー部分の周波数のスムーズネスは充分良いことが分かる。

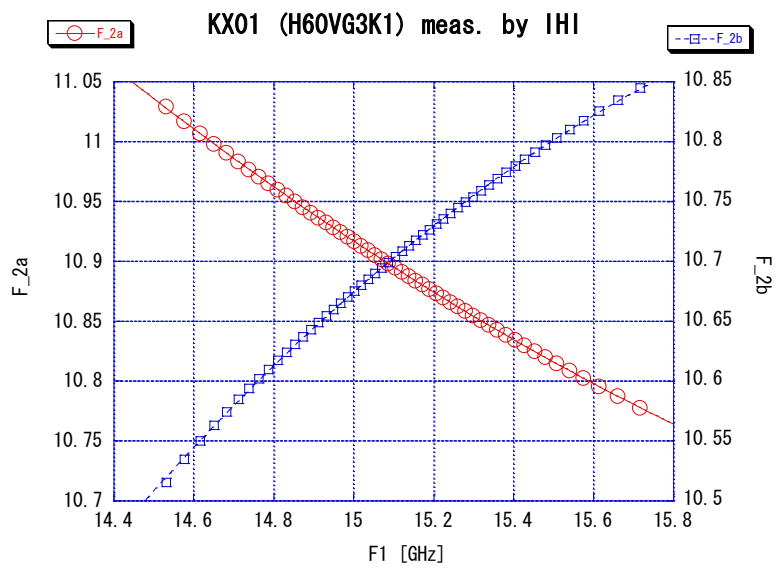


Fig. 8 Single-cell RF QC result.

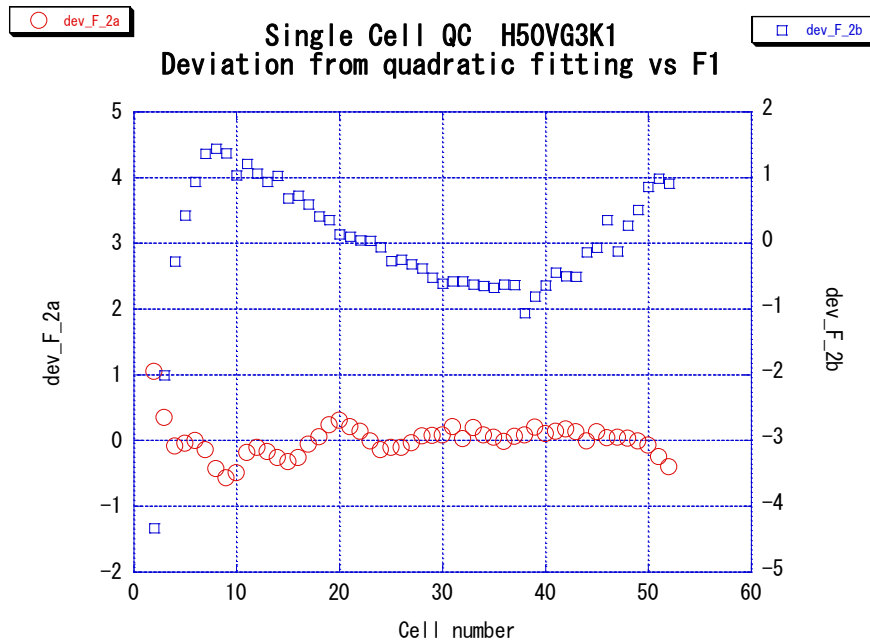


Fig. 9 Deviation from a smooth curve of single-cell RF QC.

カプラーの製作

アイリス周辺は、カップリングを正確に決めるために超精密加工を行った。旋盤加工で正確な寸法を維持させる必要があり、導波管巾 (22.86mm) とバイト先端半径 (0.4mm) により決まる最大加工可能直径に近いところまでの加工に留めた。その他はミリング加工で、 $\pm 10\mu$ の精度で製作しており、CMM による寸法確認を行っている。パーツの写真を Fig. 10 に示す。



Fig. 10 Coupler parts, body (Up) and plate (Down).

この2枚を金ロウ付け後、導波管フランジの取り付け部分をミリング加工する。この際内部に切り粉が進入しないようにマスキングを行うこと、内部に関わる部分を加工する場合 (長手方向の端面の加工時) にはオイルを用いないことを注意した。この追加工後にフランジをロウ付けしてカプラーとして完成する。

2枚の張り合わせには 50μ のシートロウを用いるが、ロウ付けにより形成される実効的なロウ材の厚さは不明であるが、設計上は SLAC の経験値 (25μ) を採用しており、実測を行うと精度が悪いのだがその値と大きく矛盾するような変化は見られていない。この推定値に対して誤差 $\pm 10\mu$ 程度にはできあがっていると予想しているが、§ 2-2 で述べたように、この程度の誤差はマッチングに対して反射 0.05 以下であり大きな問題は生まないと考えている。

4. パーツ洗浄

スタンダードディスクの洗浄に関しては、SLACの無酸素銅に対する化学洗浄[6]を手本に、KEKの実状に合わせた変更を行って、KEKでの現時点の標準洗浄を開発した[7]。エッチング時間は～15秒であり、～0.5 μm 未満の表面エッチング量であると推定している。また、カプラー関連無酸素銅パーツの洗浄は、通常ディスクと同様の液を使用するが、エッチング時間のみ1分に延ばした洗浄を行った。これは超精密加工が施されない、ミリング部分が大部分であるためである。

洗浄の様子を Fig. 11 に示す。有機溶媒でのリンス、アルカリ洗浄、酸でのエッチング、純水でのリンスを経てクリーンな環境内で窒素ブローによる乾燥を行い、真空引きにて一晩以上保存しておく。接合工程への移動は窒素パージ下で Fig. 12 に示すコンテナ容器にパックし、1～2日以内に行う。



Fig. 11 Chemical rinsing process at KEK.



Fig. 12 Cells packed for transportation from KEK.

5. 組立

KEK ではこれまで超精密加工のセルをベースに真空炉による拡散接合とロウ付けを用いて加速管の製作開発を行ってきた[8]。しかし、最近の SLAC との共同開発で製作している最近の加速管は、本体部分の拡散接合やその後の導波管等の接合ロウ付けを水素炉で行っており、これらの加速管は高電界特性に関して合格ラインの一手手前まで到達していると考えている[9]。KEK でも最短時間で実機加速管を製作する技術を開発習得し、早急に GLC の要求する開発スピードを得るため、この SLAC の組み立て技術を基本に KEK での加速管製作技術の再立ち上げを行い、これを現時点の基礎にすることにした。昨年はこの戦略に沿って 20cm 長の加速管を製作した[1]。その経験を糧に、今回の 60cm 管の製作にあたり、これを通して実機級の加速管製作技術の立ち上げすることにした。但し、60cm 管接合には KEK 水素炉は小さすぎるので、メーカーの炉を用いることにし、KEK・メーカーの炉・環境等の違いを鑑み製作を行った。

5-1 拡散接合

実際の拡散接合セッティングの上部クローズアップを Fig. 13 に示す。無酸素銅パーツと直接接触する部分にグラッシーカーボン板を用い、その外にセラミックブロックを解してステンレス治具で行う。下部の構造も同様に行う。加圧には Fig. 14 に示したように、安定性を確保できるようにステンレス板を下部にセットして用いる。グラッシーカーボンは厚さ 5 t を使用しており、両面研磨を行って平面度(1~1.5 μm)と平行度 (~1 μm 程度)を確保したものをを用いる。また、面粗さに関しては、Ra~0.13 μm であり、Rz 値は若干大きい 2 μm 以下であり、しかもかなりローカルなへこみを反映しての大きな値であるため、抑え治具としての機能には問題ないと考えている。このグラッシーカーボンに関しては文献[10]に詳しく述べるが、無酸素銅との癒着を無くし、相対的な熱膨張の違いによるスリップをスムーズに行えるようなプレートとして用いている。

これまでの真空炉での接合経験から、超精密加工したディスクの拡散接合として代表的なパラメータとしては、数 g/mm^2 程度の圧力を加えたまま 900 $^{\circ}\text{C}$ 以上に 1 時間程度保持すれば良いことが分かっている。一方、最近の SLAC との共同開発で製作している加速管では、水素炉で 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上での拡散接合が行われている。これらを総合的に判断して今回は、1 気圧の水素炉を用い、900 $^{\circ}\text{C}$ 以上を 2 時間以上キープすることを基準とした。拡散接合の実際の温度プロファイルを Fig. 15 に示す。これは加速管の上中下に ϕ 3 の測定用穴をあけてそれに熱電対を挿入して測定した。温度上昇、下降ともに大きな温度勾配は生じていないことが、及び上の拡散接合条件を満たしていることが確認できた。

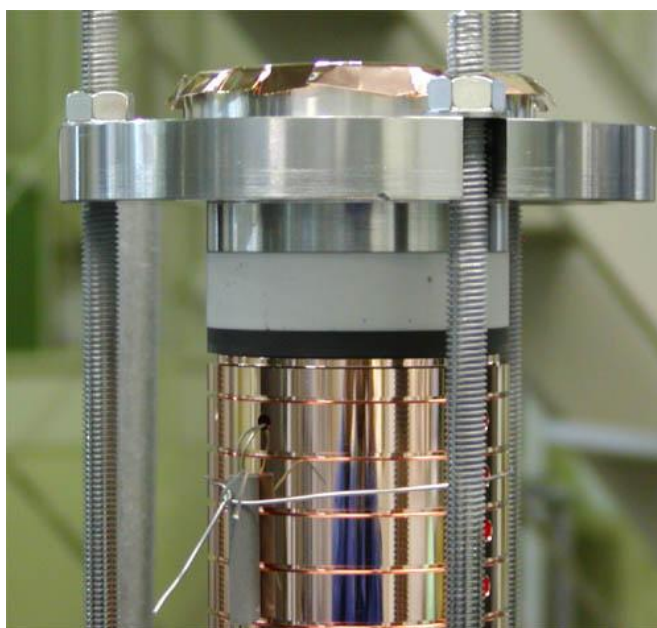


Fig. 13 Top part of diffusion bonding setup. From below are stacked copper disks of main body, glassy carbon plate (black), alumina ceramic block (white) and stainless top plate suspending four rods pulling weights located below.

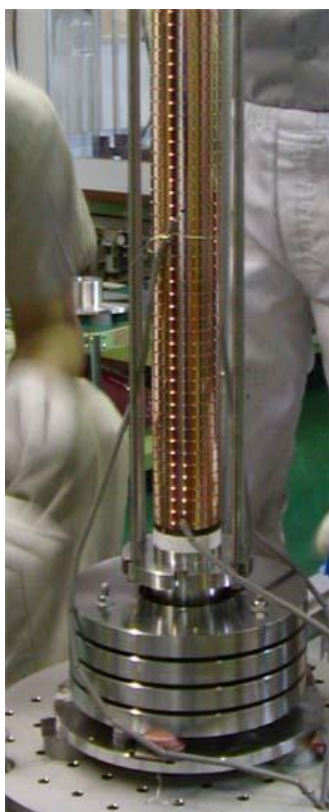


Fig. 14 Bottom part of diffusion bonding setup. Stainless steel plates are suspended by four rods hanging from top plate over the stacked cells.

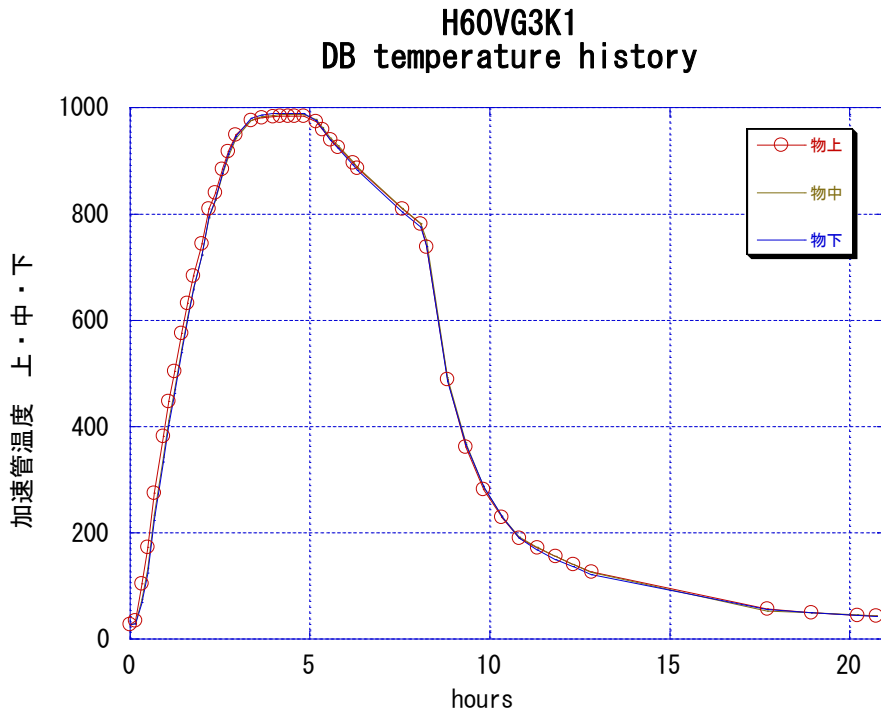


Fig. 15 Temperature profile of diffusion bonding.
Temperatures at three points along the structure are plotted.

KX01 加速管の拡散接合後の端面の写真を Fig. 16、Fig. 17 に示した。端面の結晶成長が特に著しいことが分かるが、セル内部の結晶成長も大きいことも分かる。

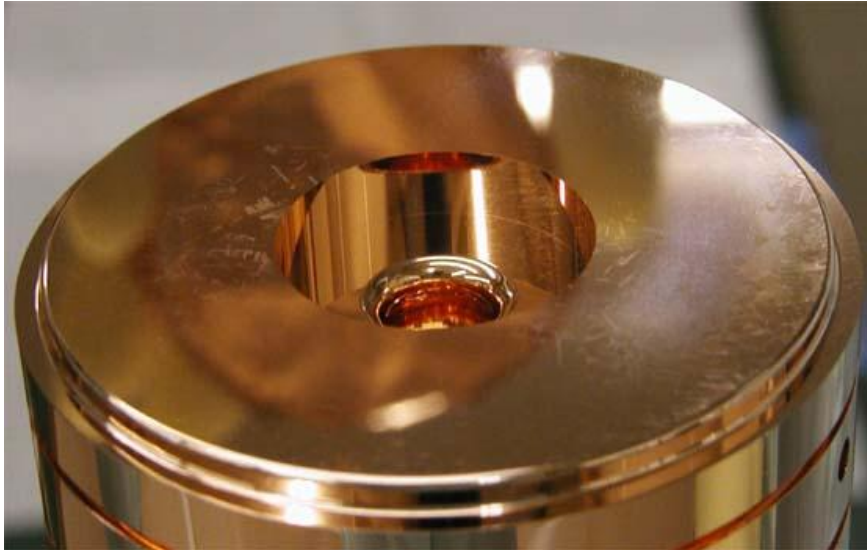


Fig. 16 End surface after diffusion bonding.

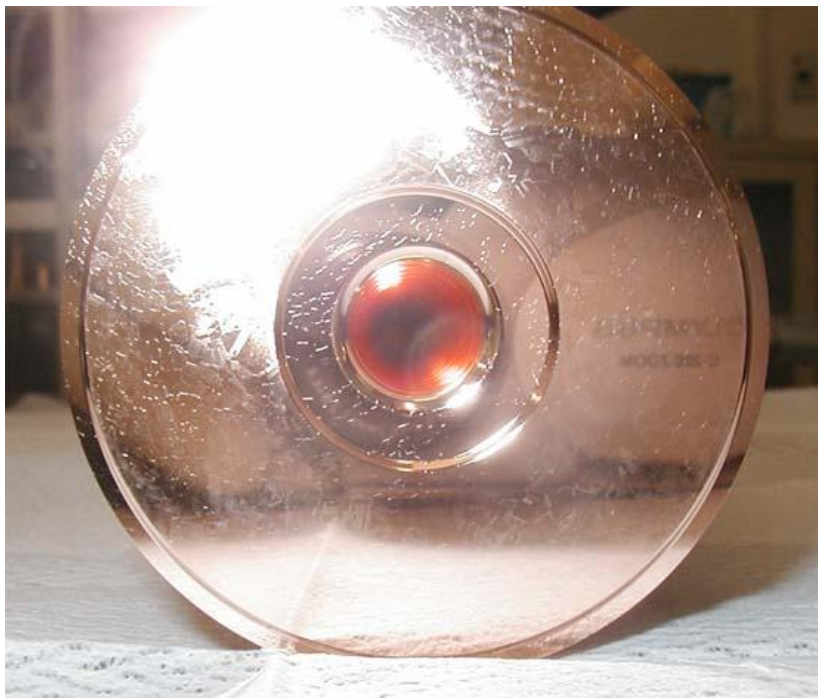


Fig. 17 Surface after diffusion bonding, showing crystal growth.

5-2 ロウ付け組立

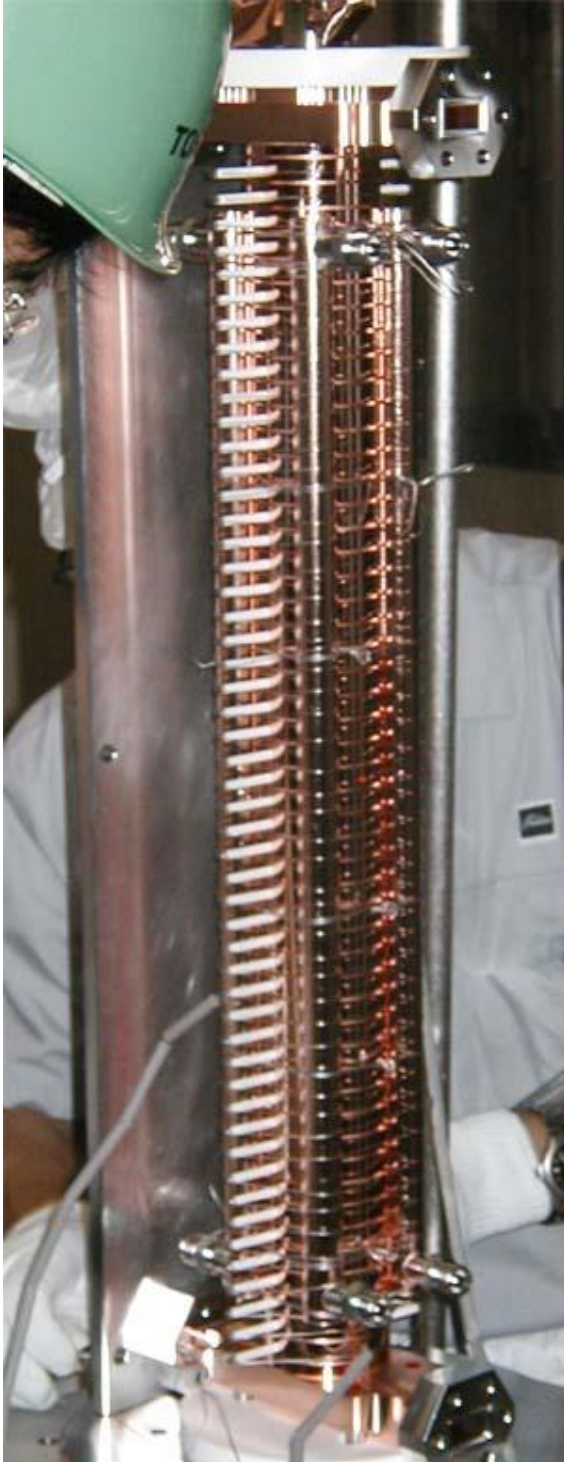


Fig. 18 にカップラーのロウ付けセットアップを示した。これから分かるように、上下に 25Au-75Cu ロウ付けされたカップラーを配し、本体部分にはコネクタ組み込み済みの水冷管、及び各セルにチューニング用のステンレスピンをロウ付けするための位置決め用セラミック等が見える。カップラーの回転位相合わせは、左側に見える一枚板を指し渡して導波管フランジを合わせる程度に行った。

作業期間は1時間程度であるが、この間は加速管内部を炉周辺の環境に曝したままになる。いわゆるクリーンルーム対応の環境ではないことは承知していたが、当面はそのまま進めざるを得ない。

Fig. 18 Brazing setup.

6. ベーキング

クライストロンのベーキングに用いる二重排気炉を用いた真空ベーキングを5日ほど行った。加速管側は2インチ程度の配管 50 cm程度の配管を介して 3000 1/秒のクライオポンプで引き、ポンプヘッドのBA真空計で全圧の測定を行う。また、その付近から更に2インチ程度の配管で 50 cm程離れた場所にQマス装置を設置して常時観測した。

真空ベーキングのトレンド結果を Fig. 19 に示す。実体温度は 480°Cを5日程度確保できた。全圧は、初期の 3×10^{-6} Pa から最高温度で 7×10^{-5} Pa まで上昇し、2日程度でもとの 2×10^{-6} Pa まで改善したが、その後の長期ベーキングでの改善は小さく、更に 500°Cから常温に降温した時も殆ど真空度の改善が無く、到達真空度は Q マス系からのアウトガスに支配されているのではないかと推量しており、加速管自身の真空度を代表していないと考えている。次回には Q マス系のベーキングが重要であると判断した。

分圧パターンは日周期を示しており、環境温度に連動しているものと理解している。また、500°Cから降温時の変化も小さいことから、全圧同様Qマス自身の真空特性を測定しているのみと判断している。

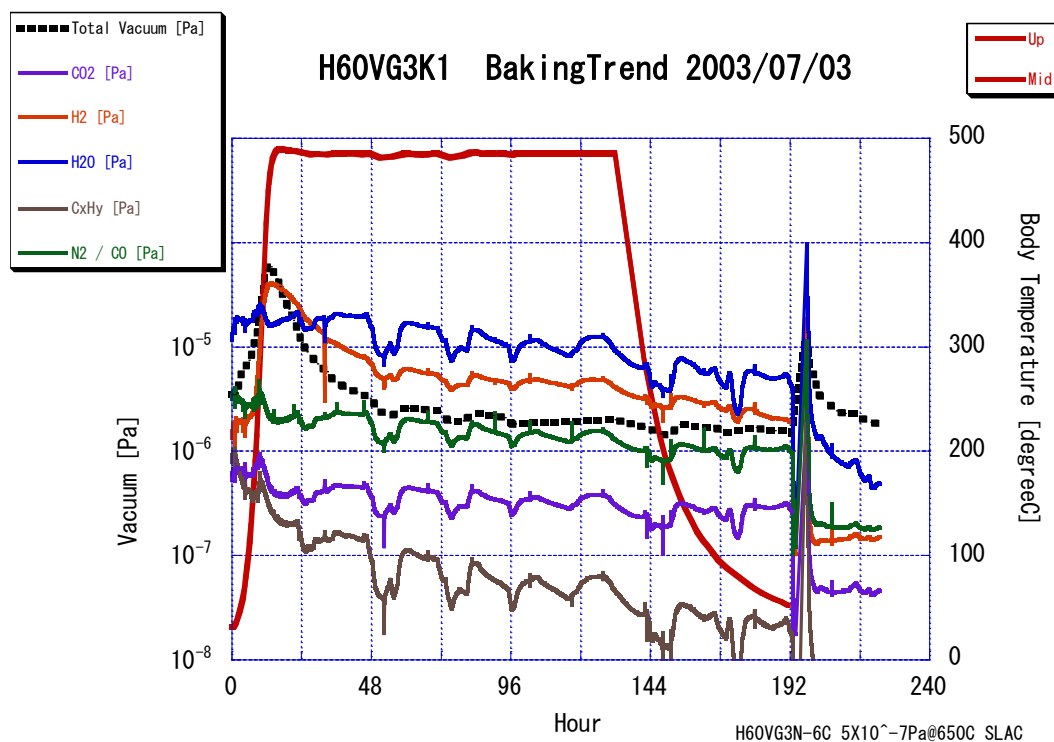


Fig. 19 VAC baking temperature of the structure and the residual gas partial pressure.

Qマス系の脱ガスを施した次回の計測との比較のために、ベーキング開始から55時間後までの6時刻での分圧スペクトルをFig. 20に示しておく。

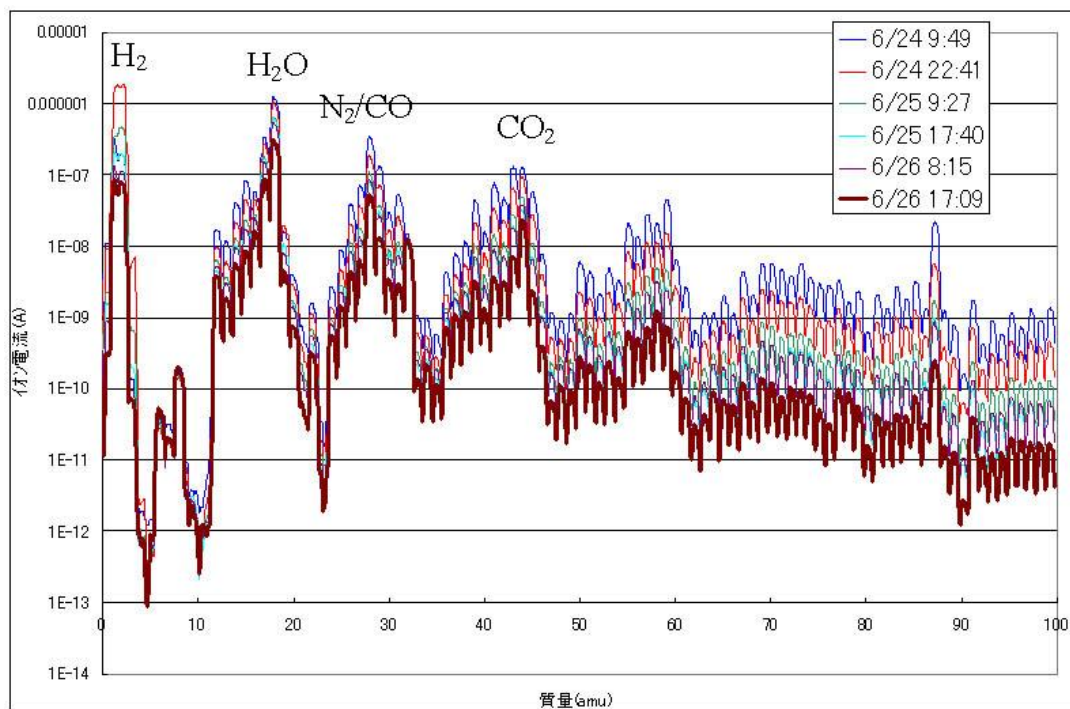


Fig. 20 Partial pressure of residual gas at several points of the VAC baking process.

7. 寸法測定

完成納入後に Fig. 21 のように、加速管全体にわたる CMM 計測を行った。セルアラインメント、ゆっくりした曲がり、カプラーの相対的位置、等の測定を行った。KX01 は高電界試験用の加速管を目指しており、厳しいアラインメント要求は課していないので、インロウにより達成される程度のセルアラインメントや、カプラー間の位置が達成されていることを確認したところで留める。

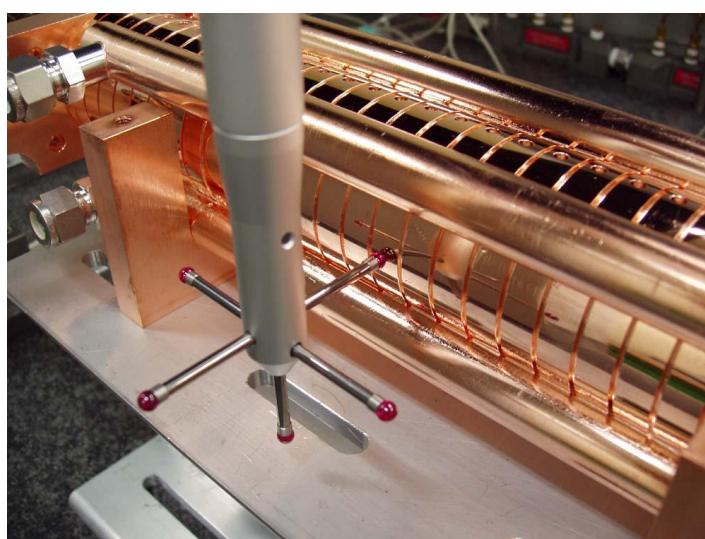


Fig. 21 CMM measurement after completion of KX01.

実際、セルのアラインメントに関する情報としては、各セルの天頂を計測した。結果を下図に示す。セル間の飛び量は10マイクロン以内であり、インロウ構造での遊び分は直径で最大40マイクロンであり、これから予想される最大値の半分になっていることが確認できた。また、緩やかな曲がりに関しては、50マイクロン程度あり、これと直交する方向も同じ程度あるとして70マイクロン級の曲がりが生じていると考えられる。この量は、各セル間で10マイクロン級のずれがあり、これがランダムに重なった場合の

$$10 \times \sqrt{55/2} \approx 50 \text{ ミクロン}$$

と同程度であり、インロウ構造からくる誤差による曲がり支配的ではないかと考えている。セルピッチも計測して、下図に示したが、ほぼ設計通りに仕上がっていることが判明した。

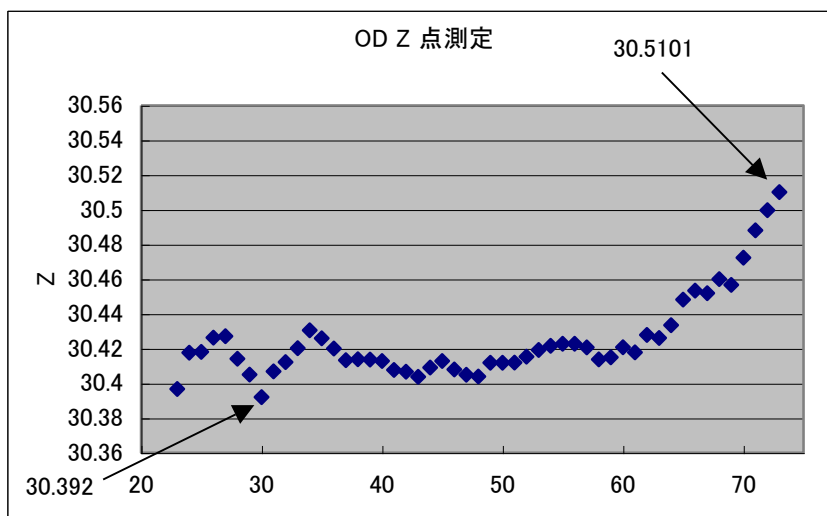


図 横方向アラインメント (mm)

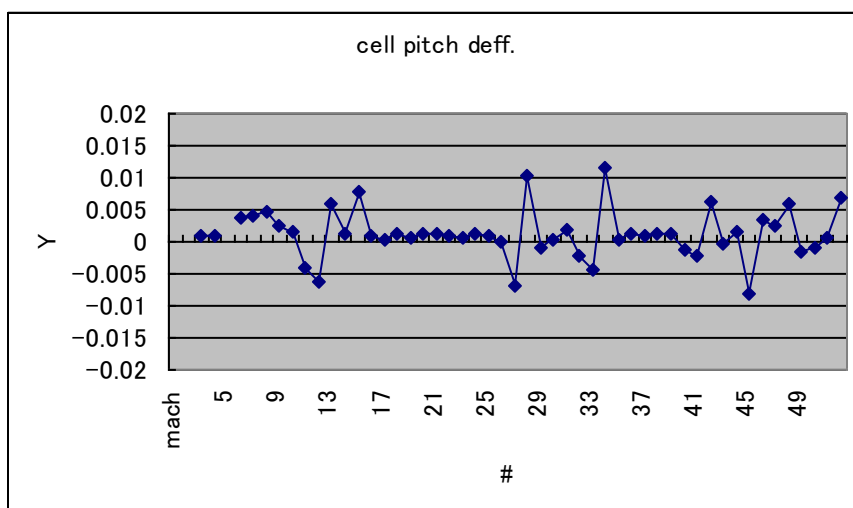
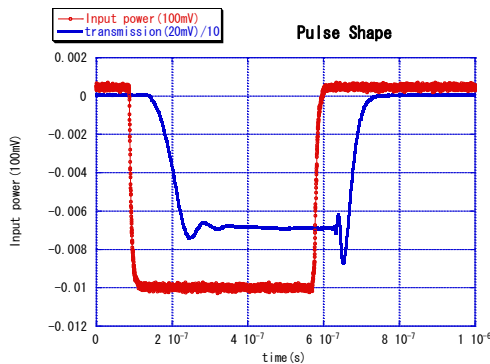


図 縦方向セルピッチ計測値 (設計値とのずれ (mm))

8. RF計測とチューニング

等価特性



031212

Fig. 22 に実際の 400ns パルスを入力したときの出力パルス波形を示した。インプット→アウトプットへの伝達 S21 を周波数ドメインで計測しその周波数微分より求めた群遅延時間（加速管充填時間に対応）は 105nsec であり、デザインやパルス測定と矛盾しない。

Fig. 22 Transmission measurement in actual pulse.

マッチング特性

チューニングの最終段階における上流（インプット）、下流（アウトプット）それぞれのカプラーから見た加速管のマッチング特性を Fig. 23 と Fig. 24 に掲げた。インプット側からときの反射は-25dB 以下であるが、アウトプット側から見ると-17dB 程度しかなく、若干悪いままである。

これは、アウトプットカプラー近辺での局所的電界上昇が著しいため、マッチング特性は若干犠牲にして電場の上昇をできるだけ抑える出チューニングを行ったためである。ベストマッチング時(040203)からデチューニングを経た最終状態(040221)への変遷を Fig. 25 に示した。Fig. 6 に示したように、カプラー部分は当然であるが、マッチング用セル（#1 及び #5 3）にも周波数チューニング機構を付加してなかったため、マッチングはそれらを飛び越えて本体側のレギュラーセルにて行うことになった。このためアウトプット側でいうと、 mismatches ソース（主にカプラー近辺と思われる）とセル（#5 1、#5 2）との間に StandingWave が立つことになったためと考えている。これにより、マッチングセルへチューニング機構を付加することが重要であることを認識した。

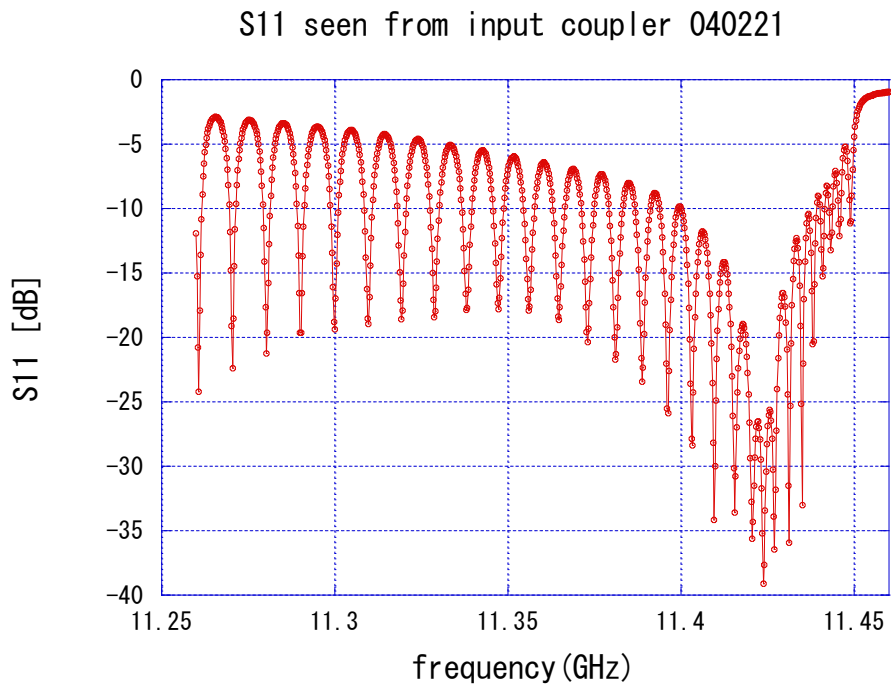


Fig. 23 Final measurement of reflection seen from input coupler.

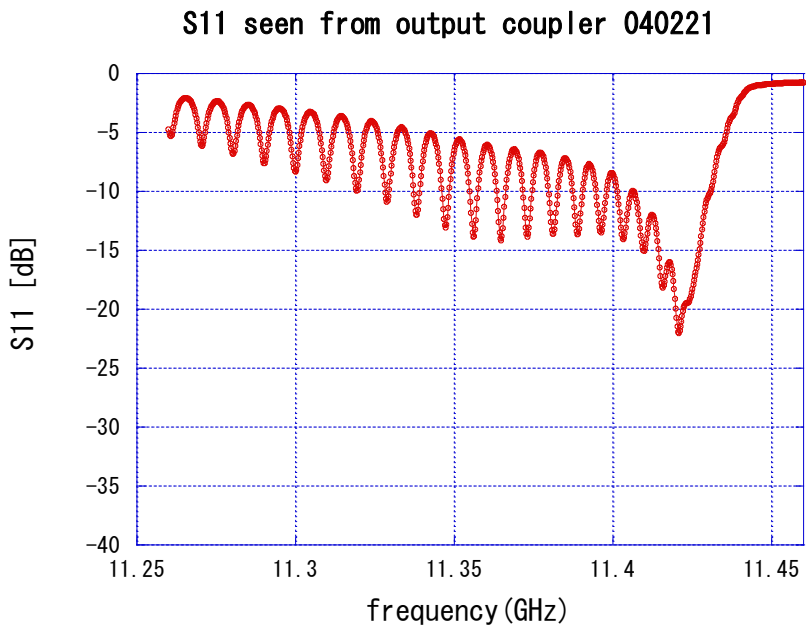


Fig. 24 Final measurement of reflection seen from output coupler.

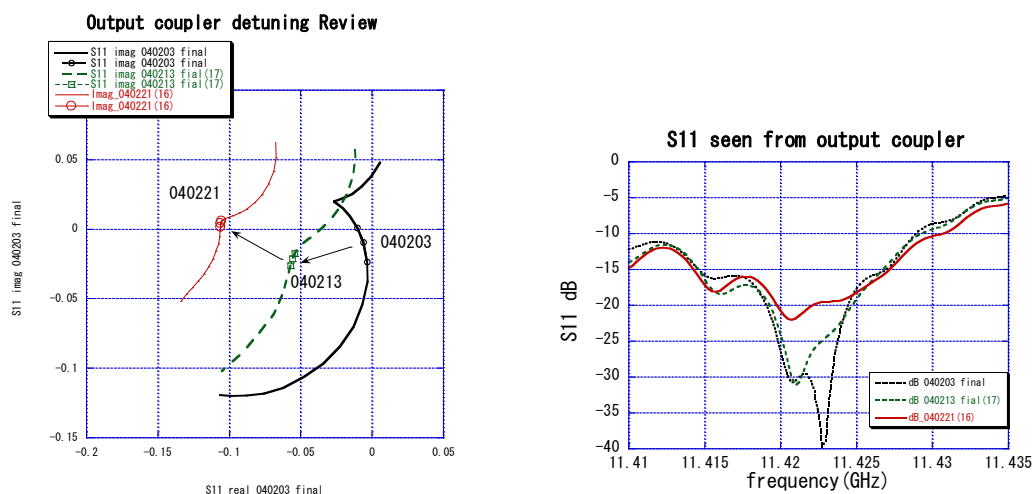


Fig. 25 Output coupler detuning to recover field flatness near output coupler.

ビードプルによる加速電界測定

ビードプルによる加速電界の測定は[11]に詳しい。これに従って測定した結果を Fig. 26 に示した。赤線は①設計、緑は②組立完成時、紫破線は③アウトプットカプラーのベストマッチング時、青線は④デチューニングを経た最終状態である。③ではマッチングセル (# 5 3) の上流 2 セル (# 5 2 & # 5 1) の電界がチューニングにより局所的にあがってしまったことが見える。今回の KX01 では、アウトプットのカプラーのマッチングを若干犠牲にして④まで改善したが、未だ # 5 2 セルの電界増大を抑えることができずこれ以上は難しいと判断し、この時点でチューニングを完了とした。最終状態の測定値を Fig. 27 に見やすく載せておく。これから得られた知見は、

1. リップルは±3%におさめることができた。但し、これは内部からの反射を適宜キャンセルすることにより相殺でき更に均一な電場を実現できるはずであろう。
2. マッチングセルの上流セルの電場は15%程度大きい。これはマッチングセルのチューニングが無いためにチューニングが難しいことに対応していると考えられる。

等である。

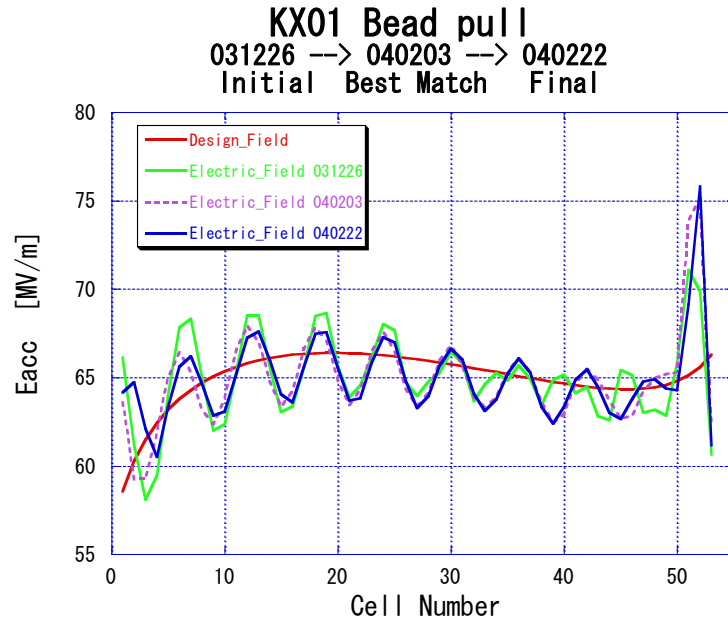


Fig. 26 Evolution of Eacc field, from initial measurement as of assembly completion to the final through tuning/detuning process.

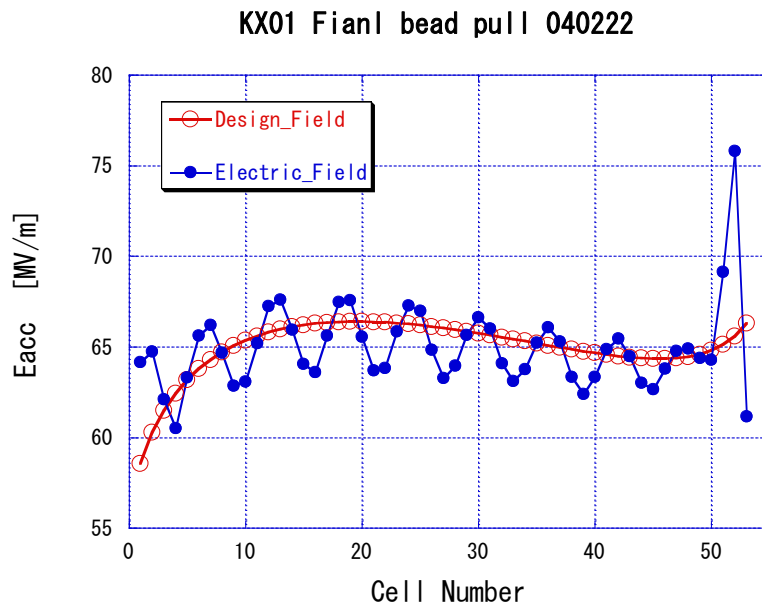


Fig. 27 Accelerating field along the structure in the final bead pull result. Red open circles are design value, while blue solid circles are those measured.

9. 高電界試験へ

この加速管は現在 XTF (GLCTA) で高電界試験を継続中であるが、その詳細は別に報告する。ここでは、高電界試験までの履歴を確認する。

加速管は真空ベークを行った後納入され、KEK 内超精密加工用のクリーンルームにてチューニングが行われた。その間2ヶ月以上にわたるが、加速管は、窒素フロー、あるいはある程度の密閉状態での保管を行っている。クリーンルームでは空気フロー内のゴミ等は充分管理されており少ないはずであるが、空中の水分などが長期的に少量ずつ表面に吸着して表面の劣化につながっている可能性を念頭におく必要があると考えている。

チューニング後、窒素パージ状態で高電界試験のためアセンブリホールに移され、テープヒーターによる 200°C 程度のベーキングを実質2日程度行った。アルミ фольで断熱する前の状況を Fig. 28 に示す。真空度は約2桁改善し、Q マスを付けた状態で 3×10^{-7} Pa 程度に到達した。



Fig. 28 Heater setup for baking at KEK.

最後に窒素パージに気をつけながら、しかし数時間程度の期間は窒素と周辺の空気との入れ換えが行われるのはやむをえないとして、現場設置を行った。

これまでの試験結果は、概ね SLAC の NLCTA での試験結果とほぼ同等の対放電特性が得られていることを述べるに留めることにし、詳細は別報告にゆだねる。

10. Acknowledgments

本加速管を製作するにあたり、本体部分の設計はリニアコライダーにおける SLAC との共同開発によるものであり、SLAC の Z. Li 氏によるところ大である。また、超精密加工と拡散接合による製作方法は、KEK が築いてきた技術であるが、最近の SLAC との共同開発研究により得られた、SLAC 流の水素炉ベースの組立、特にロウ付け接合に関する様々なノウハウを基礎としており、SLAC の加速管製作関係者、C. Pearson、G. Bowden 氏らによるものである。これらの方々に加え、全般に通じて共同開発を推し進めて頂いた J. Wang 氏に対し得大きく感謝致します。

参考文献

-
- ¹ 工藤昇他、「ロウ付け技術開発の現状」、第4回高エネ研メカ・ワークショップ報告集、MW03-21、KEK-Proceedings 2003-9, October, 2003.
 - ² C.D. Nantista et al, “Design of structure couplers”, ISG9, SLAC, 2002.
 - ³ C.D. Nantista et al, “Novel Accelerator Structure Couplers”, PAC2003, May 12-16, 2003, Portland, USA.
 - ⁴ N. Kroll et al., “Application of Time Domain Simulations to Coupler Design of Periodical Structure”, LINAC 2000, Monterey, CA, USA, Aug. 21-25, 2000.
 - ⁵ A. Lounine and T. Higo, “Precise designing of RF coupler for accelerator structure”, The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, 1P-070, Tsukuba, 2003.
 - ⁶ SLAC SPEC No.C1 “Chemical cleaning of O.F.H.C. Copper”, Prepared by J. Pope, 1/19/89.
 - ⁷ N. Higashi et al., “Surface treatment of disks made by ultra-precision diamond turning”, GLCX-008, 2003.
 - ⁸ JLC Design Study, KEK Report 97-1, April, 1997.
 - ⁹ International Study Group Progress Report, KEK Report 2000-7, SLAC R-559, April, 2000.
 - ¹⁰ T. Higo et al., “Application of Glassy Carbon for Diffusion Bonding Setup”, to be published.
 - ¹¹ T. Higo et al., “RF characteristics evaluation and tuning process of X-band 60cm-long accelerator structure”, GLCX-012, 2004.