

Cバンドチョークモード型加速管の製作

三浦 禎雄^{1,A)}、松本 浩^{B)}、新竹 積^{C)}、稲垣 隆宏^{C)}

A) 三菱重工株式会社 プラント・交通システム事業センター 〒729-0393 広島県三原市糸崎町5007番地

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

C) 理化学研究所、SPRING-8播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

概要

今回、我々は、理研殿 SASE-FEL 向け Cバンド チョークモード型加速管を製作した。本加速管は、運転周波数5712MHz、空洞数89+2カプラーセル、 $\tau=0.53$ 、 $tF=296\text{ns}$ 、加速モード $3\pi/4$ モード、全長1.8mの準定電場勾配型進行波加速管で、レギュラーセルはチョーク型構造、カプラー空洞はJ型2開口型である。MHIでは1998年に既に本タイプの加速管を電鋳法にて製作したが、今回はろう付けによって接合した。ろう付け組立後の低レベルRF測定結果は、中心周波数 $f_0=5712.102\text{MHz}$ で、入出力VSWR1.06、累積相誤差 $2\sqrt{\sum \theta_i^2}/91=3.1\text{deg}$ であった。本加速管は2003年夏より、理研播磨研究所にて高電界試験の予定である。

1. はじめに

チョークモード型加速構造は、1992年にKEK（理研）新竹主任研究員により提案^[1]されたもので、図1.に示すように、加速空洞、チョークフィルター、高調波吸収部から成る。 $f=5712\text{MHz}$ の加速周波数はチョークフィルターにより加速空洞内部に閉じ込められ、一方、ビームが誘起する帯域の広い高調波はフィルターを通り抜け、加速空洞外周に設置されたSiC電磁波吸収体に吸収される。このため、先行するビームが誘起する高調波により、後続のビームが影響を受けないため、低エミッタンスのビームを安定に加速できるという特徴を持つ。

本構造の加速管は、1998年に既に電鋳法にて三菱

重工名古屋航空宇宙システム製作所で製作され^[2]、SLACのASSETにおけるビーム試験で、ビームの誘起する高調波の減衰が仕様通りであることが確認された^[3]。この試験では、設計仕様以内の大きさではあったが、20~25GHzに予想外の振動が観測された。この原因は主に開発途中でシャントインピーダンスの向上をねらい、ディスク厚を4mmから3mmへと変更したことにより、高調波の一部が空洞内部にトラップされたためであることが、後の調査で判明した。設計段階のコンピュータシミュレーションでは、モデルのディスク枚数を制限したために、ビームパイプにパワーが逃げていたようである。

今回、我々は、この問題を解決するために、ディスク厚を元の4mmへと戻し、さらに加速管の接合方法をろう付けによって製作した。ろう付け方法は高温で処理されるため、電鋳法に比べて加速管本体（無酸素銅HIP材）の機械強度が低くなり、また接合時の変形も大きいとされているが、製作が容易で、あらかじめ個々のセルに冷却水路を加工しておくことができるので、任意に水路を設定できる利点がある。図1に示すように、水路はセル外縁に8本設置し、加速管軸方向の温度差を低減するために、隣り合う水路流れ方向を逆向き（カウンターフロー）となるように設計した。

2. 加速管の設計

ディスクの厚 t を3mmから4mmへと戻したため、加速管セル2a,2b寸法を、superfishを用いて再計算し、 $\tau=0.53$ 、quasi-C.G.となるように加速管の基本パラメーターを決定した。これを、旧設計（ $t=3\text{mm}$ ）と合わせて表1に示す。ディスク厚 t を厚くしたために、ややQが劣化し、シャントインピーダンスがさがっていることがわかるが、本使用では問題にならない。

さらに、MAFIAを用いて高調波吸収部の最適化設計も行った。図2.に最適化した時の高調波減衰状況を、旧設計と合わせて示した。明らかに今回の設計の方が急速に高調波が収束していることがわかる。

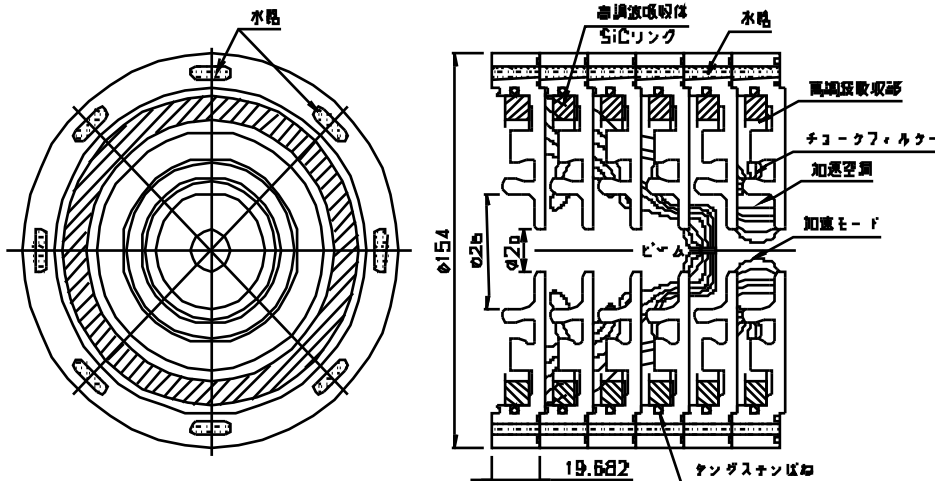


図1: チョーク型加速構造

¹ E-mail: sadao_miura@mhi.co.jp

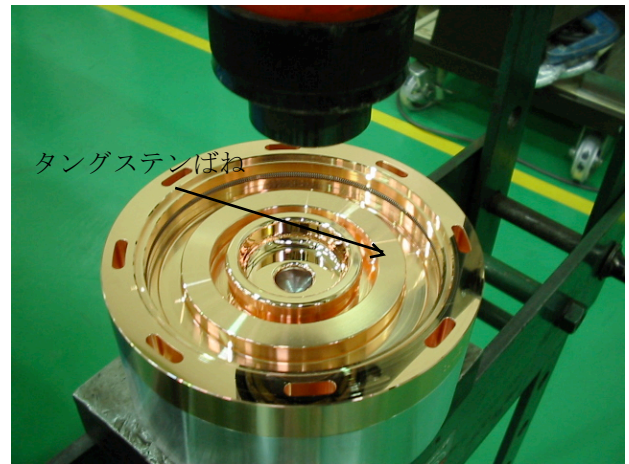
表1：加速管パラメーター

	旧設計	新設計	実機測定値	
周波数(MHz)	5712		5712.109	
加速モード	3E/4		-	
加速勾配	Quasi- C.G.		-	
空洞数	89+2coupler cell		-	
実効加速長	1791mm		-	
2a径	上流側	17.4mm	17.3mm	-
	下流側	12.5mm	13.6mm	-
2b径	上流側	45.3mm	45.7mm	-
	下流側	43.3mm	44.0mm	-
ディスク厚t	3mm	4mm	-	
Q	10700~ 10300	10200~9900	平均10700	
群速度	0.035c~ 0.012c	0.031c~ 0.013c	平均0.019c	
シャフト インピーダンス	53.0~ 67.3MΩ/m	49.3~ 60.0MΩ/m	-	
τ	0.53		0.52	

あたり、新たに変わった点について以下に述べる。

3.1 SiCの保持

加速管をろう付けで接合するにあたり、SiCの保持方法を変更する必要があった。電鍍法で製作した時は、SiCの保持にはMulti-Contact社のMC-Multilam（材質：Be-Cu）を使用したが、ろう付けされると軟化してしまい、これは使用できない。今回我々は線径φ0.4mm、巻径3mmのタングステンばねによってSiCを保持する方法をとった。（図3）ばねつばし代0.3mmでSiCの保持力は約10kgfで、供試体でろう



付けによって保持力が低下しないことを確認した。

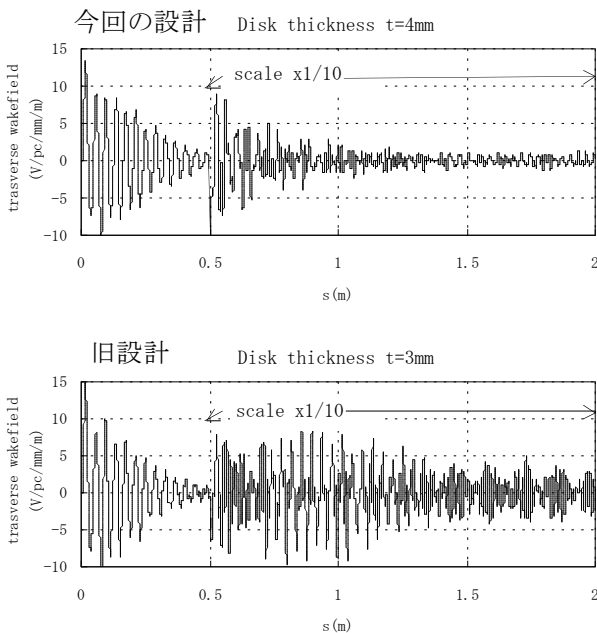
図3：タングステンばね装着状況

3.2 ろう付けによる周波数変化

一般に、ろう付け加速管は、空洞内径をやや大きめに製作しておき、ろう付け後に、外部からロッド等にて空洞内壁を变形させ、周波数を調整する手法をとる。しかしながら、チョークモード型加速管では構造的にこの方式をとることはできない。従って、ろう付け前後での周波数変化を正確に把握しておく必要がある。このため、2a、2b径の異なる4種類の6セルCI管（基準空洞）を製作し、 $3\pi/4$ モード共振周波数を5712MHz±100kHzに調整した後、ろう付け前後の周波数測定を行った。4種類のCI管ディメンジョンはちょうど加速管最上流側、最下流側及び中間部分2点と等しくとり、実機加速管をろう付けする時にかかる荷重と等しい荷重をかけてろう付けした

図4に印可荷重に対する、 $3\pi/4$ モード周波数変化量のグラフを示す。印可荷重の最も軽いType A（最上流側）の場合が最も周波数変化量が小さく、印可荷重125kgのType Cの時にピーク値340kHzとなり、さらに印可荷重の大きいType D（最下流側）では逆に周波数変化量は少なくなることがわかる。

ろう付け前に、各セルの周波数を5712MHzに対して0.3MHz低い5711.7MHzに合わせ、ろう付けした時、図4に従って、各セルの周波数が変化したとした時の、ビームのRF位相からのずれを図5黒線でプロットした。セルの累積位相は加速管全体に渡ってほとんど変化無いことが予想された。



フリックタイム	286ns	296ns	309ns
---------	-------	-------	-------

図2：高調波減衰状況

3. 加速管の製作

加速管セルは図1に示したように水路一体型で外径φ154mm、セル長19.682mmで、材質は無酸素銅Class-1をHIP処理したものを使用した。内面は超精密旋盤にて鏡面加工を行った。基本的な製作方法は文献[1]と変わらないが、今回ろう付けで接合するに

実機ろう付け後での、ビーズ法にて測定した移相グラフを図6に示す。ろう付け前は中心周波数f=5711.655MHzに合わせた。ろう付け後の中心周波数はf=5712.109MHzと予想よりやや大きく、やや移相が流れたが、運転温度を約1度上げることで対処する。ろう付け後の累積移相誤差2乗平均 $\sqrt{\sum \theta_i^2/91}=3.1\text{deg}$ であった。

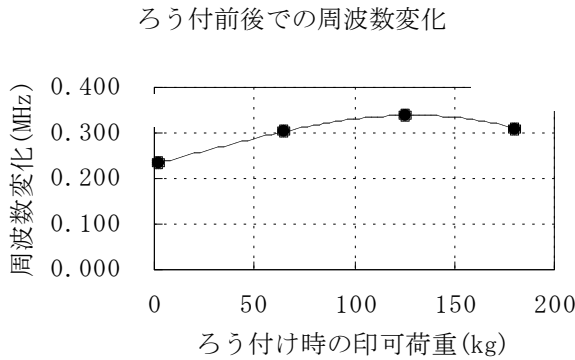


図4:ろう付前後での周波数変化

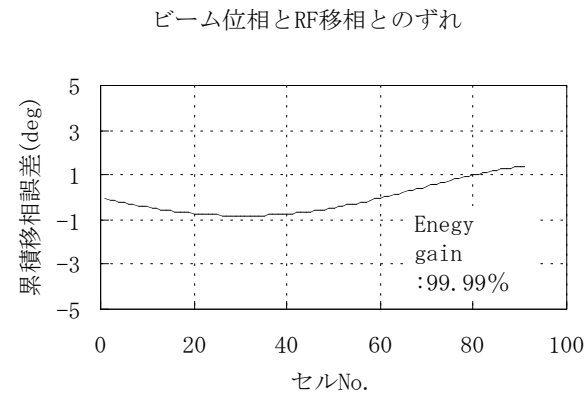


図5: ろう付け前に周波数f=5711.7MHzに合わせた時の、ろう付け後移相予想

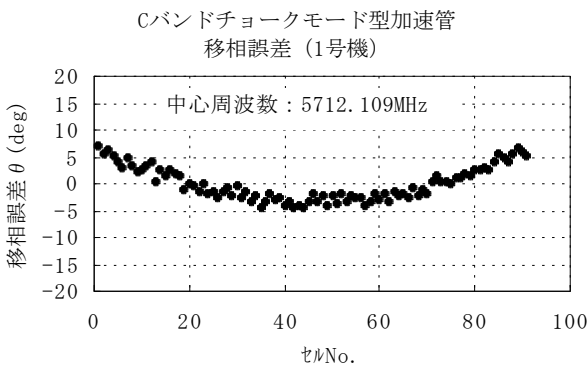


図6: 加速管累積移相誤差

3.3 加速管のカプラーの調整

前回の製作時と同様に、本加速管のカプラーは、カプラー空洞部での電磁場対象性を良くするため、KEK松本助教授の考案したJ型2開口型である。

進行波加速管のカプラーの調整にはR.L.kyle⁴⁾の方法がよく使用される。この方法はカプラー空洞の移相調整とカップリング調整をそれぞれ独立に調整することができるために、非常に調整しやすい方法であるが、本加速管のようにカプラーセルとレギュラーセルのR/Qが大きく異なる場合には、目標カプラー空洞周波数が狂ってしまうために、そのままでは適用できない。等価回路解析により、カプラーセル及びレギュラーセルのR/Qから目標カプラー空洞周波数を算出することもできるが、R/Qの計算精度から、VSWR1.05以下となる周波数精度（上流側2.5MHz、下流側1MHz）を得ることができない。

このため、今回、我々は、基準空洞を利用した変形kyle法という調整手法を開発し、この方法でカプラーの調整を行った。カプラー調整後の加速管入力VSWRは図7、8に示す。中心周波数でVSWR約1.06が得られた。

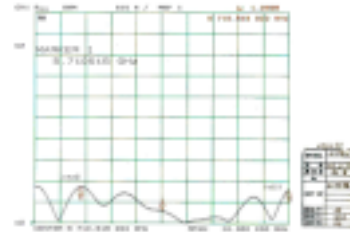


図7: 加速管入力VSWR

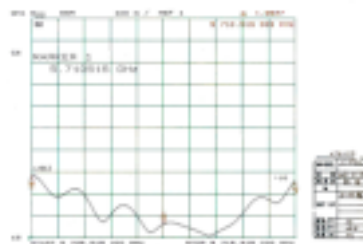


図8: 加速管出力VSWR

4. まとめ

本加速管は2003年夏より、理研播磨研究所にて高電界試験予定である。

参考文献

- [1] T.Shintake. "The Chork Mode Cavity", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31 (1992) pp.L1567-L1570, Part2, No.11A, 1 Nov. 1992
- [2] H. Matsumoto et al. "Fabrication of the C-band (5712MHz) Choke-Mode Type Damping Accelerating Structure", Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan
- [3] T.Shintake et al. "The First Wakefield Test on the Choke-Mode Accelerating Structure", Proceedings of the PAC '99
- [4] E. Westbrook, "Microwave Impedance Matching of Feed Waveguides to the Disk-Loaded Accelerator Structure Operating in the $2\pi/3$ Mode", SLAC-TN-63-103.1963.