

Super KEKBに向けたC-Band Dummy Load と 3dB Hybrid Coupler の開発

杉村 高志、大沢 哲、山口 誠哉、紙谷 琢哉、大越 隆夫、池田 光男、柿原 和久
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

KEKにある電子、陽電子入射ライナックのS-band 加速管の一部をC-Band加速管で置き換える計画があり、そのために使用するDummy Loadおよび3dB Hybrid Couplerの設計および製作を行った。設計に当たってはHFSSによる計算を行った後Cold Modelによる低電力試験を行いその結果からパラメータを最適化した。本機の製作後に低電力RF測定を行なった。

1. はじめに

Super KEKBでは電子と陽電子の入射エネルギーを交換することを計画している。入射ライナックの陽電子のエネルギーを上げるために一部の加速管をC-Band化することでより高い加速勾配を得る。C-band化に際しては様々な開発要素が存在するがここではDummy Loadと3 dB Hybrid Couplerの開発を取り上げる。

C-bandによるビーム加速に使用されたDummy Loadや3 dB Hybrid Couplerは存在しないため全くの新規設計となった。

2. 3dB HYBRID COUPLER

2.1 設計方針

設計に当たりRFの仕様は現在のS-Band用Hybrid Couplerを参考に以下のように決定した^[1]。

表 1 : 3dB Hybrid Coupler仕様

周波数	5712MHz
VSWR	1.05以下
位相差	$90 \pm 1^\circ$
結合度	-3.0 ± 0.15 dB

またHybrid Couplerの平面図を図1に示す。従来のS-band用では中央部のE面の上下にチューニングボタンをEBWにより取り付け、その突き出し量をチューニングのパラメータとしていたが、EBWによるひずみのRF特性に対する影響の大きさと、ボタン部での放電を懸念し今回はこの方式をとらなかった。表1に示された3つ仕様を満たすために図1のL1,L2,L3の3つのパラメータについて最適化を行うこととした。

Hybridの3つのポートについているH-bendについてはVSWRができるだけ小さくなりかつ導波管(WRJ-5)とフランジによる結合が可能のように中心半径の

最適化をHFSSにより行い中心半径を107.30mmと決定した。この寸法は単体で使用するH-Bendと同等である。

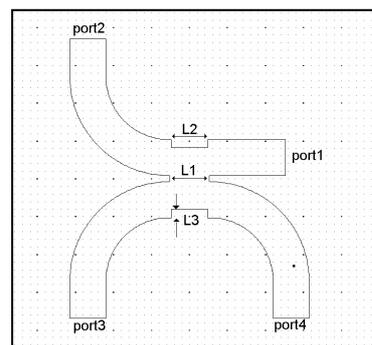


図 1 3dB Hybrid Coupler 平面図

2.2 HFSSによるシミュレーション

Ansoft社製HFSS (Version8.0および8.5) を用い寸法の最適化を行った。L1,L2,L3をそれぞれ1~91 mm、20~95 mm、1~11 mmの範囲内で変化させ仕様を満たすもの探索した。表2にVSWRの良いもの上位5番までを掲載した。この中から位相差、結合度も考慮して(L1,L2,L3)=(52.6,46.0,10.7)をCold Modelの中心寸法とした。

表2: HFSSによるHybrid CouplerのVSWR上位5位 Phaseはport2、port3間の位相差の90°からのずれを表しpower divideはport2とport3結合度の差を表す。

L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Phase (°)	Power divide (dB)	VSWR
52.6	47.0	10.7	0.30	0.05	1.009
52.6	47.0	10.6	0.12	-0.05	1.011
52.6	46.0	10.7	0.08	-0.03	1.014
52.6	48.0	10.6	0.10	0.02	1.015
52.6	46.0	10.74	0.14	0.01	1.016

2.3 Cold Model製作およびRF測定

HFSSによるシミュレーションを基にCold Modelを製作した。このCold ModelはL2,L3を可変とし最適なパラメータを実測により得る。L1については52.6 mmに固定した。可変方式とするためにL2,L3をそれ

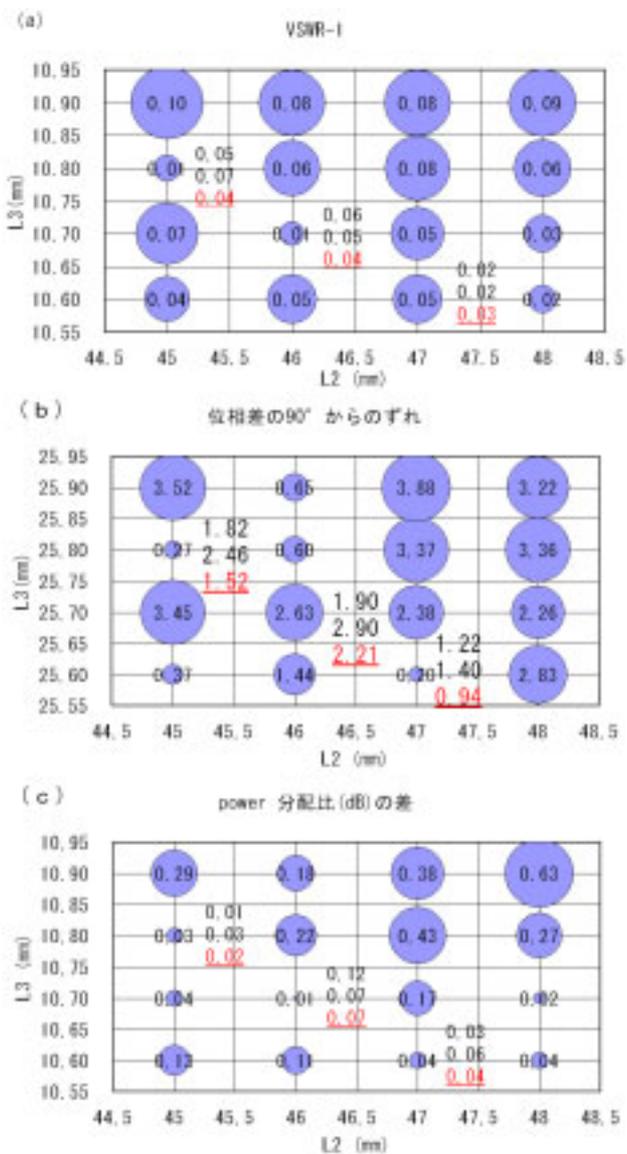


図 2 Cold Modelの測定によるHybrid CouplerのRF特性

各グラフ内の円の大きさはVSWRでは1.00、位相差では90.00°、結合度では3.0dBからのずれを示す。右横の数字は他の再測定の値。赤は平均値。

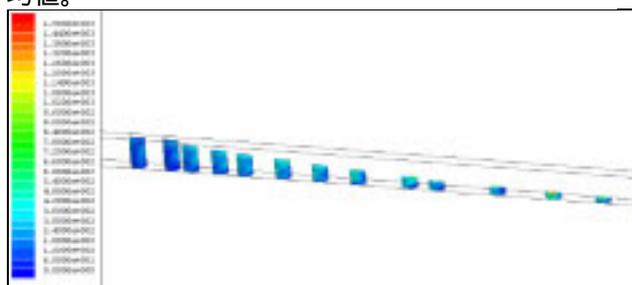


図 3 HFSSによるSiC表面の電場分布(1/4)

それぞれ4通りに変えた計16種類のプラグを作りHybrid Couplerの左右から差し替える方式を採った。

Cold Modelでの測定結果を図2(a) ~ (c)に示す。これらの測定結果からVSWR、位相差、結合度のすべてにおいて仕様を満たした、L2=47.0mm, L3=10.6mmを実機Hybrid Couplerの製作寸法とした。

2.4 実機RF特性

実機のRF特性の測定結果を表3に示す。VSWRについては仕様を満たしている。位相についてはCold Modelの測定時にもこの程度のばらつきが見られるので、ほぼ仕様を満たしていると判断した。結合度については大きくずれており原因を追及する必要があると判る。

表3：3dB Hybrid Coupler RF特性

周波数	5712 MHz
VSWR	1.033
位相差	88.93°
結合度の差	0.227 dB

3 . DUMMY LOAD

3.1 設計方針

Dummy Loadの入力RF電力を以下のように決定した。C-band化に当たり加速電界をS-bandに比較し2倍の40 MV/mと設定し、それに基づく加速管の設計からクライストロン出力は40MW、パルス幅2 μsec、繰り返し20 ppsとなりその平均電力は4 kWとなる。この電力をHybrid Couplerにより二分しそれぞれDummy Loadで吸収させることから一本あたりの吸収電力は2 kWとした。またVSWRとしてはS-Band用Dummy Loadを参考に1.1以下を仕様とした。

Dummy Loadの構造は水漏れ事故を起さぬよう砲弾型SiCを用いた直接冷却方式は採らず導波管のH面に円筒状のSiCを口ウ付けした間接冷却方式を採ることとした。SiC円筒が20 /mm以上の温度勾配を持つと割れることが経験的に知られていたため、今回のDummy Loadの製作にあってはSiC円筒の温度勾配が突出したものが無いよう配慮した。

3.2 HFSSによるシミュレーション

SiCの焼結には時間がかかることより製作日程の都合からHFSSを用いたパラメータの最適化とSiCの焼結行程を並行して行った。そのためHFSSによるシミュレーションでは使用するSiCの高さについては製作したものの中からの組み合わせで選ぶこととなり、それらの配置間隔をパラメータとして最適化を行った。具体的には以下のように最適化を行った。

1. SiCの高さの組み合わせを決め30 mmの等間隔で配置する。

2. 一番奥のSiCの位置を現在の位置を中心に一定量前後に動かしてVSWRを計算。
3. 前に計算したVSWRが一番小さいものを基準とし一つ手前のSiCについて同様に計算。
4. すべてのSiCについて3.を繰り返す。
5. 移動する幅を半分にしながらか既定の量になるまで2.～4.を繰り返す。

今回の最適化では移動幅は8 mmから開始し0.5 mmになるまで行った。このようにしてVSWRを最小化した状態でのSiC表面での最大電場強度を基に各SiCへの入力RF電力を求め、この電力すべてが円筒の頂点面から入ったワーストケースを仮定してSiC内の温度勾配を求めた。温度勾配の最大値が最も小さいSiCの高さの組み合わせをCold Modelによる最適化の始発点とした。SiC表面の電場分布を図3に示す。この電場分布より求めた各SiCの発熱に関する値を図4に示す。温度勾配に関しては破壊限界以下になっていることが判る。

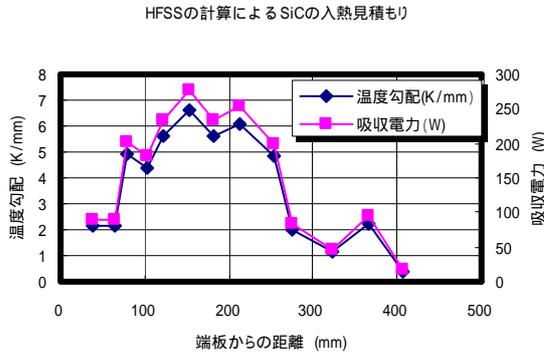


図4 SiC入熱計算 Dummy Loadに2 kW 入力したときのもの。

3.3 Cold ModelによるRF測定

Cold ModelはSiCを接着した銅のプレートとプレート間に挟むスペーサを各種用意しこれらを取り替えることで様々な形状でのRF特性を測定出来るものとなっている。今回のCold Modelによる形状決定ではHFSSのシミュレーションにより決定した形状を始発点としHFSSによるシミュレーション時に用いたVSWRの最小化と同じアルゴリズムを用いてVSWRの最小値を得る配置を求めた。SiCの位置の移動幅は2 mmから始め0.5 mmまで行った。このようにして得られた配置を図16に示す。このときのVSWRは1.003であった。また軸方向の電場分布をビード摂動法により測定した。その結果を図5に示す。SiCの円筒間に定在波が立っているのが見えるが全体として穏やかにRFパワーが吸収されているのが判る。

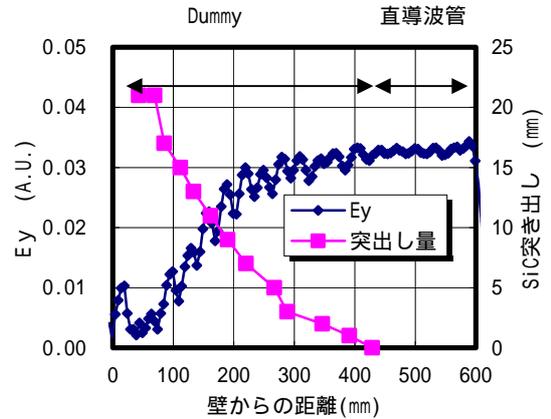


図5 Dummy Load (Cold Model) 軸方向電場分布とSiCの配置

3.4 実機RF特性

今回のC-band化では1 mの加速管1本のみをインストールするので、Dummy Loadは加速管下流側にHybridを通じて接続する3本のみ必要である。よって実機は3本製作した。これらのVSWRの測定を行った。結果は表4の通りである。いずれも1.1以下であり仕様を満たしていることが判る。

表4: Dummy Load RF特性

Dummy Load	VSWR
No.1	1.015
No.2	1.034
No.3	1.025

4. まとめ

C-band大電力用3dB Hybrid CouplerおよびDummy Loadの開発を行った。そのためまずHFSSによるシミュレーションを基にCold Modelを用いてパラメータの最適化を行った。そのパラメータを基に実機を製作し低電力RF測定を行った。その結果Hybrid Couplerについては結合度に非対称性が見られた。このことについては大電力試験の後再度測定を行う予定である。Dummy Loadについては製作した3本とも仕様を満たすものとなった。

参考文献

- [1] 五十嵐康仁, 山口誠哉, 榎本収志, “KEKB入射器増強用加速ユニットの高周波特性”, KEK Report 98-12, January 1999 A