

J-PARC リニアック立体回路システムの設計と調整

菅沼 和明^{1,A)}, 穴見 昌三^{B)}, 久保田 親^{B)}, 千代 悦司^{A)}, 山口 誠哉^{B)}
A) 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター 加速器グループ
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
B) 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

J-PARCリニアック高周波立体回路システムの設計と調整について報告する。汎用電磁場解析ソフトを使い立体回路各素子の設計を行った結果、測定値とよく一致する結果が得られた。立体回路システムの調整では、加速空洞からの要求である、2つの入力結合器における電場の振幅と位相の誤差を $\pm 1\%$, $\pm 1^\circ$ 以内とするための調整方法について報告する。

1. はじめに

J-PARCプロジェクト^[1]のリニアックは周波数324MHzと972MHzを使用し、負水素イオンをエネルギー400MeVまで加速する。324MHz高周波源（クライストロン、電源、Low-Level-RFなど）は製作に入り、平成16年秋のリニアック棟竣工と同時に設置する予定になっている。972MHzも含めた高周波源全体についてはテクニカルレポート^[2]を参照いただき、ここでは324MHz立体回路システムの設計と調整について述べる。図1に324MHz立体回路システム全体の立面図を、図2に324MHz立体回路システム1ユニットの系統図を示す。324MHz立体回路システムはEIA規格WR-2300導波管（断面寸法584.2mm×292.1mm）とEIA規格WX-203D同軸管で構成し、一部の導波管については導波管断面の短辺が1/2になっている扁平導波管を採用している。クライストロン出力から空洞入口までの間で多数の立体回路素子（サーキュレーター、電力分配器、移相器、Hコーナー、Eコーナー、同軸導波管変換器など）を用いているので、全系での反射を小さくするためには各素子の反射を十分小さく

(VSWR<1.05)することが必要である。今回、立体回路システムの中で、設計が未了であった扁平導波管の素子、HとEの両コーナー、標準扁平導波管変換器の設計をおこなった。

本立体回路システムは、1つのクライストロンから2つの入力結合器へ高周波電力を供給する構成になっている。加速空洞からの要求である振幅と位相の誤差を $\pm 1\%$, $\pm 1^\circ$ 以内とするための立体回路の調整方法を報告する。

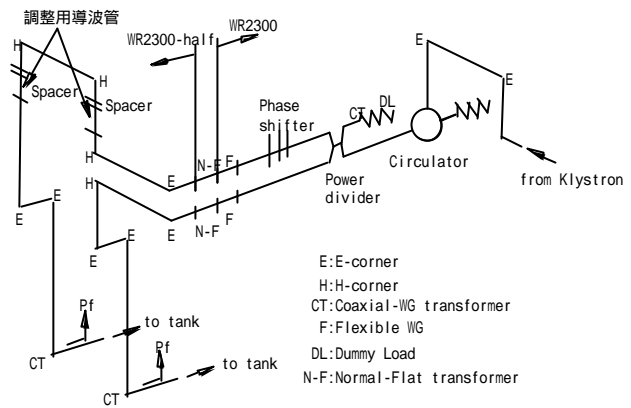


図2 324MHz立体回路システム1ユニットの系統図 .

2. 立体回路素子の設計と測定

設計には電磁場解析ソフト(HFSS)を用いたが、立体回路素子の設計をおこなう前に矩形導波管の管内波長および遮断周波数が解析解^[3]と一致することを確認した。図3に立体回路素子の計算モデル(計算機入力形状)を示す。HとEの両コーナーは寸法bを、標準扁平導波管変換器は寸法Lと寸法hを変化させ計算し、寸法の変化ごとにVSWRを求め

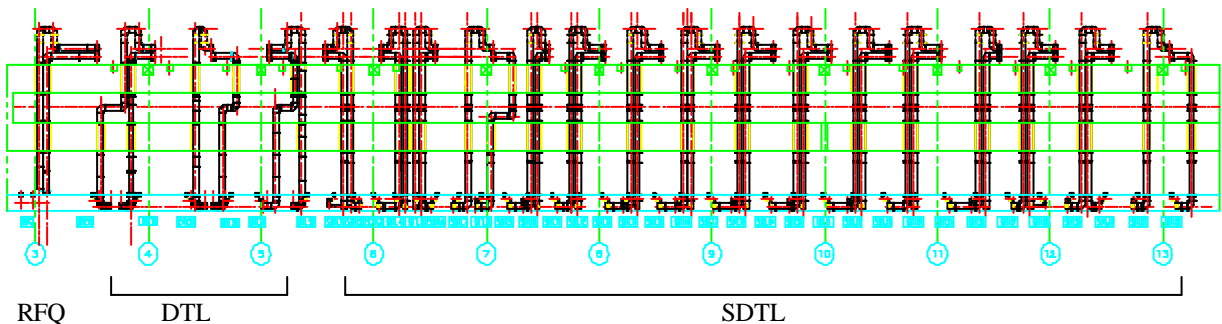


図1 324MHz立体回路システム全体の立面図 .

¹ E-mail: suganuma@linac.tokai.jaeri.go.jp

た。つぎに実際に立体回路素子を製作し測定をおこなった。計算と同じように、EとHの両コーナーは寸法**b**を、標準扁平導波管変換器は寸法**L**と寸法**h**を変化させ（各寸法を小さめに作っておき、アルミ板を銅テープで貼り付け）、変化ごとにVSWRを測定した。

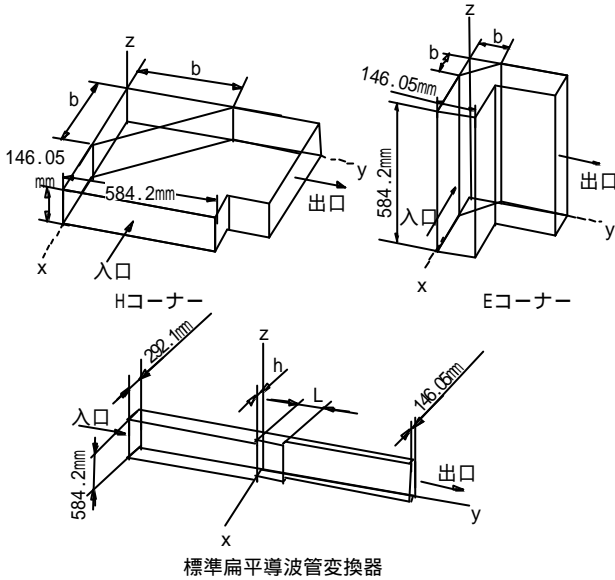
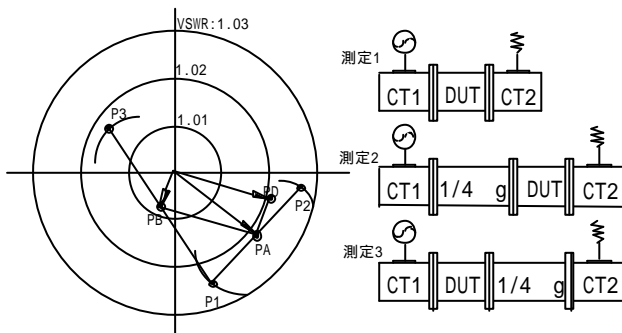


図3 324MHz立体回路素子の計算モデル。

測定にはAgilent Technologies社のネットワークアナライザ 8753ESを使用している。ここで測定前の校正はTRL校正と1ポート校正の2校正をおこない、HとEの両コーナーの測定を実施した。標準扁平導波管変換器はTRL後の測定のみ実施した。図4に1ポート校正後の測定方法を示す。N型同軸導波管変換器と324MHzの $g/4$ の長さの導波管を組み合わせ測定し極座標表示している。



- CT1: 同軸導波管変換機 (信号発生器側)
- CT2: 同軸導波管変換機 (終端器側)
- DUT: 被測定物 (Device Under Test)
- P1: 測定1に対する座標
- P2: 測定2に対する座標
- P3: 測定3にたいする座標
- PA: P1とP2の中点, PB: P1とP3の中点
- PD: PA-PB

図4 ポート校正後の測定手順。

それぞれのベクトルを合成することにより被測定物の値を求めている。(求める反射ベクトルはPDであたえられる。)図5にHとEの両コーナーの計算値と測定値を示す。両校正の測定値はよく一致した。また計算値は、それらの測定値とよく一致している。図6に標準扁平導波管変換器の計算値と測定値を示す。測定は2つの素子を向かい合わせにし(標準導波管側)おこなった。等高線のパターンは異なるが、VSWR極小をあたえる寸法**L**と寸法**h**の組み合わせはほぼ一致した。

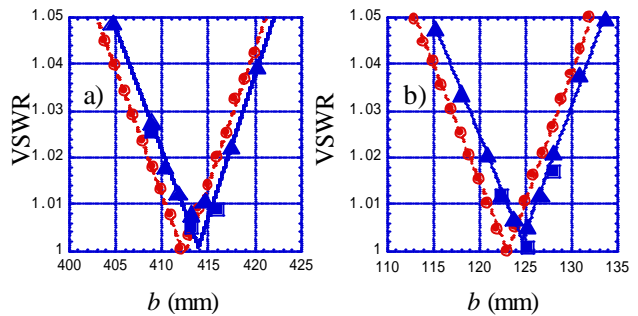


図5 HとE両コーナーの計算値と測定値。
a) Hコーナー, b) Eコーナー。

● : 計算値,
■ : 測定値(TRL校正後), □ : 測定値(1ポート校正後)

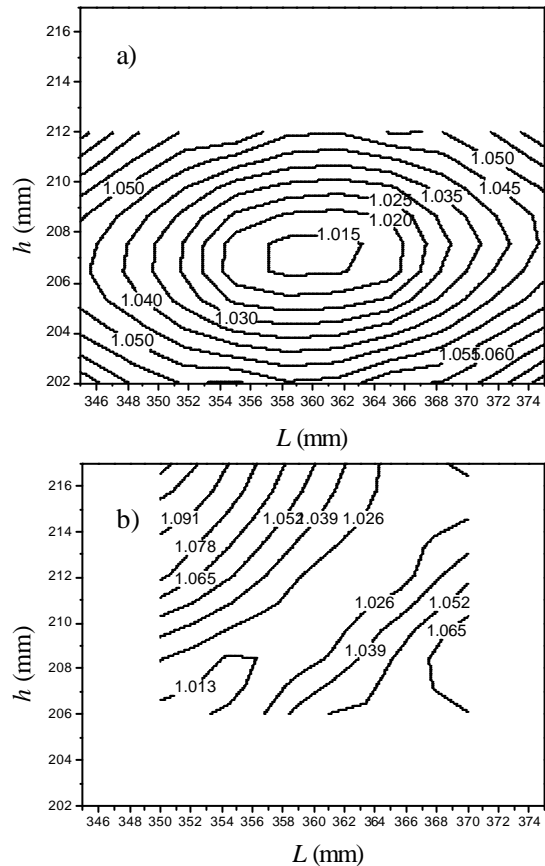


図6 標準扁平導波管のVSWRの
a) 計算値と b) 測定値。
は決定寸法を示す。

3. 立体回路システムの調整

3.1 調整手順

立体回路システムの調整手順を以下に記す。

- 1) 各立体回路素子の位相長より計算される全位相長(分配器入口から空洞入口まで)を算出し、位相調整用導波管(図2参照)の長さを決定する。
- 2) サーキュレーター直前のEコーナーから、2つの入力ポート直前に取り付けられた203D-N型変換器までの振幅、位相を測定し、スペーサー(図2参照)を使ってさらに相対位相差が小さくなるよう調整をおこなう。
- 3) 立体回路素子の分配器と位相器を使って電力分配比と相対位相差が $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ 以下となるように最終調整をおこなう。
- 4) 2つの空洞への入力電力モニター(60dBの方向性結合器,図2のPf)の振幅、位相差を測定する。この差をオフセットとする。

3.2 測定値と中間周波数の関係

振幅と位相の一連の測定において、方向性結合器をとおした測定値は不安定であった。ネットワークアナライザの中間周波数のバンド幅と測定バラツキの標準偏差(30回測定での標準偏差)の関係を求めた。図7に中間周波数のバンド幅を変えたときの振幅と位相の標準偏差を示す。60dB以上の減衰がある場合に、振幅、位相を $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ よりも十分小さい精度で測定するためには、ネットワークアナライザの中間周波数のバンド幅の設定値を100Hz以下にする必要があることがわかる。この時のパワーレベルは+10dBmにしている。また、同一人物の作業によるN型コネクタの脱着誤差はおよそ ± 0.01 dBであった。

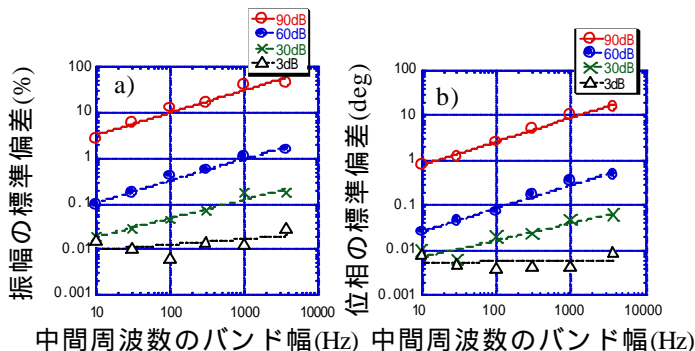


図7 中間周波数のバンド幅と振幅,位相の標準偏差の関係. a) 振幅, b) 位相.

ネットワークアナライザのノイズレベル(N)は、中間周波数のバンド幅(IFBW)に比例するが、S/N比が悪い場合、測定値の標準偏差(σ)はNに比例するので、結局、 σ はIFBWの平方根に比例する。

3.3 振幅と位相の調整

分配器を使って振幅の調整を実施した。位相差の調整は位相器の3スタブを用い、分配比の調整は分配器の調整ボタンを用いておこなう^[2]。まず、移相器によって位相差が $\pm 1^\circ$ 以下になるように調整し、つぎに分配器によって分配比が $\pm 1\%$ 以下になるように調整する。このとき分配比を変えても位相差はほとんど変化しない^[2]。図8に分配器の調整ボタン位置と分配比および位相差の関係を示す。調整ボタンの位置を64mmにすることにより2つの入力ポートにおいて分配比の値を等しくすることができる。

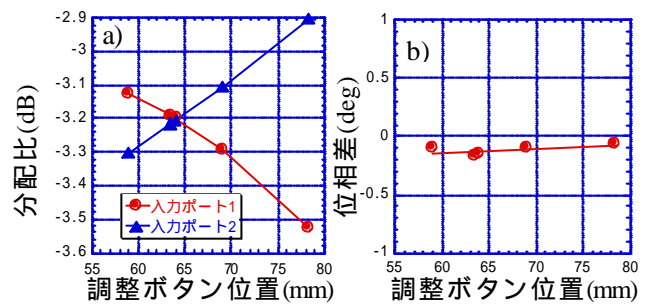


図8 分配器の調整ボタン位置と a) 分配比, b) 位相差の関係.

4. まとめ

汎用電磁場解析ソフトを使って立体回路素子の設計をおこない、測定値とよく一致する結果がえられた。この結果をもとに量産に入っている。

立体回路システムの調整では、組み立て段階での調整をおこなった。2つの入力ポートにおける電場の振幅の差と位相の差を $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ 以内にするための測定方法を確立した。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, "The JAERI-KEK Joint Project for The High-Intensity Proton Accelerator, J-PARC", PAC2003, Portland(2003).
- [2] High-Intensity Proton Accelerator Project Team, "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC" JAERI-Tech 2003-044, KEK Report 2002-13.
- [3] 安部英太郎, "マイクロ波技術" 東京大学出版会(1979).