

大強度陽子加速器用超伝導空洞の高周波入力結合器

加古 永治¹、野口 修一
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

高エネ研と原研との統合計画である大強度陽子加速器では、400 MeVから600 MeVにおいて超伝導線形加速器が使用される予定である。この線形加速器に用いられる超伝導加速空洞として、周波数972 MHz、 $\beta = 0.725$ のニオブ製9セル空洞が設計された。この空洞に取り付けられる高周波入力結合器について開発の現状を報告する。

1. はじめに

統合計画において超伝導線形加速器は、H⁻ビームを400 MeVから600 MeVまでエネルギー増強するのに用いられ、加速された600 MeVのH⁻ビームは、第2期計画で行われるADS実験に供給される。この線形加速器には、2台の9セル超伝導空洞を内蔵した11台のクライオモジュールが設置される予定である。超伝導空洞は、超流動液体ヘリウムにより2Kまで冷却され、約10 MV/mの加速電界で運転される。この超伝導空洞に高周波電力を供給するのが入力結合器であり、空洞端のビームパイプに取り付けられる。大強度陽子加速器はパルス運転されるため、入力結合器での熱負荷は軽減されるが、一方、放射化に対する配慮を必要とする。ここでは、電磁界計算コード(HFSS)を用いて設計された入力結合器の高周波特性について報告をする。

2. 超伝導加速空洞

プロトタイプの超伝導空洞として、図1に示すような $\beta = 0.725$ (424 MeV)のニオブ製9セル空洞(結合ポートなし)が設計された。このセル形状は、表1に示す加速モードの各パラメータの最適化およびトラップモードと呼ばれる有害な高調波モードの除去などを考慮して、決定された[1]。

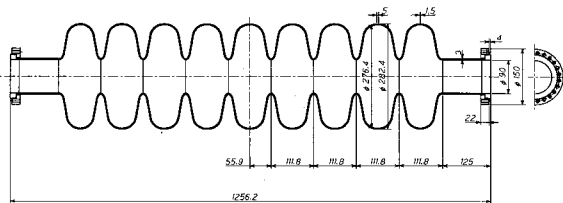


図1: 972 MHz (0.725) 超伝導空洞
表1: 加速モードの基本パラメータ

Esp/Eacc	3.03	
Hsp/Eacc	55.0	Oe/MV/m
R/Q	496.	Ω
Geometrical factor	206.	Ω
Cell-to-cell coupling	2.85	%

3. 入力結合器の高周波特性

3.1 入射電力および外部Q値

超伝導線形加速器は、ビーム電流(I_{beam})30 mA、ビームパルス幅1~2 msec、繰り返し25 Hzでパルス運転される。また、この超伝導空洞の加速電界(E_{acc})は10 MV/m、同期位相(θ)は -30° である。この時、ビーム電力(P_{beam})との整合条件下における入力結合器の入射電力(P_{input})および外部Q値(Q_{ext})は、次式で表される。

$$P_{input} = P_{beam} = I_{beam} * E_{acc} * L_{cavity} * \cos\theta$$

$$Q_{ext} = \omega U / P_{beam}$$

ここで、 L_{cavity} は空洞実効長、 ω は共振角周波数、 U は空洞内蓄積エネルギーで $\omega U = (E_{acc} * L_{cavity})^2 / (R/Q)$ により与えられる。ビーム電流30 mAにおいて必要とされる入射電力は250 kWであり、この時の外部Q値として $Q_{ext} = 8 \times 10^5$ が得られる。

超伝導空洞のパルス運転時に問題となるローレンツデチューニングによる加速電界の振動を抑制する手段の一つとして、外部Q値を下げるのが有効である。したがって、 $Q_{ext} = 5 \times 10^5$ および $P_{input} = 300 \text{ kW}$ を本入力結合器の仕様とした。この時、バンド幅は~2 kHz、フィリング時間は~0.2 msecとなる。

3.2 高周波結合特性

入力結合器の外部Q値は、図2に示すような2つのアンテナを付けた単セルのモデル空洞において、HFSSにより計算された。右側のビームパイプは、結合を強めるために広げられ、 $\phi 80$ の入力結合器用ポートが接続し、内部に50 Ω の同軸となるアンテナが突き出ている。ビームパイプの直径(ϕD)、アンテナ中心とセル端との間隔(L)、ビーム軸とアンテナ先端との距離(T)をパラメータとして計算された。図2に示される結果より、 $L = 95 \text{ mm}$ 、 $T = 35 \text{ mm}$ 、 $\phi D = 126 \text{ mm}$ が外部Q値として 5×10^5 を得るために適当な寸法となる。

¹ E-mail: eiji.kako@kek.jp

この計算結果は、実際の銅製モデル空洞において確認される予定である。

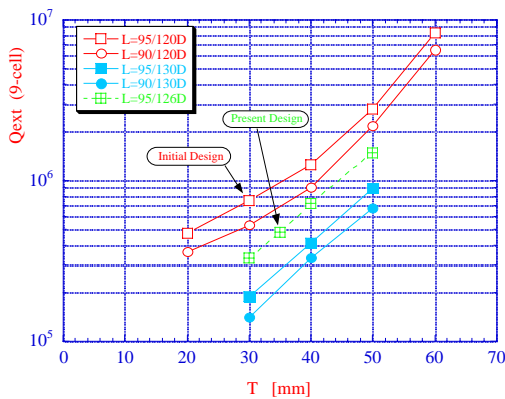


図 2 : アンテナ寸法位置と外部 Q 値との関係

3.3 高周波損失

空洞の共振周波数における空洞内部の電磁界分布を図 3 に示すように HFSS により求めることができる。この計算結果に、空洞各部の表面抵抗を与えることによって高周波損失による発熱を評価できる。加速電界 1.0 MV/m のとき、アンテナ先端部での表面磁界は約 2000 A/m であり、入力結合器との接合フランジ近辺では約 800 A/m である (図 2 中、Initial Design の場合)。この時、デューティ 5% のパルス運転において、銅製アンテナ先端部での発熱量は約 2 W 、結合ポートの接合フランジ付近の幅 3 cm を常伝導のニオブとすると 0.2 W 程度の発熱量が見積もられ、いずれも強制冷却の必要性の可否の判断に影響を与える値となる。

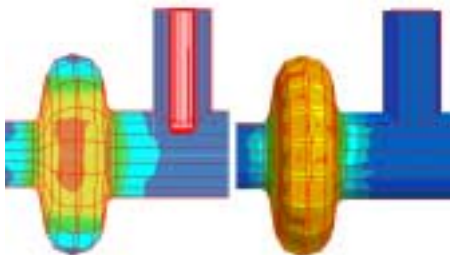


図 3 : 空洞断面電界 (左) と空洞内表面磁界 (右)

4 . 入力結合器用各機器の設計

972 MHz 入力結合器に関する機器の設計は、トリスタン用 508 MHz 超伝導加速空洞に用いられた入力結合器 [2] での経験に基づき、508 MHz 入力結合器を参照することにより行われた。

4.1 同軸導波管変換器

972 MHz 用同軸導波管変換器 (ドアノブ) は、WR975 導波管と 120 D の同軸線路との間のモード変換を行う。内装されるドアノブ部分の外径および高さ、導波管の短絡板の位置をパラメータとして最適化を行い、より良い整合条件を得るため、導波管の横幅を標準寸法より狭くした。図 4 に、設計された寸法形状およびその周波数特性の計算値を示す。972 MHz での VSWR の設計値は、1.05 であり、実機製作後の測定値は、1.16 であった。

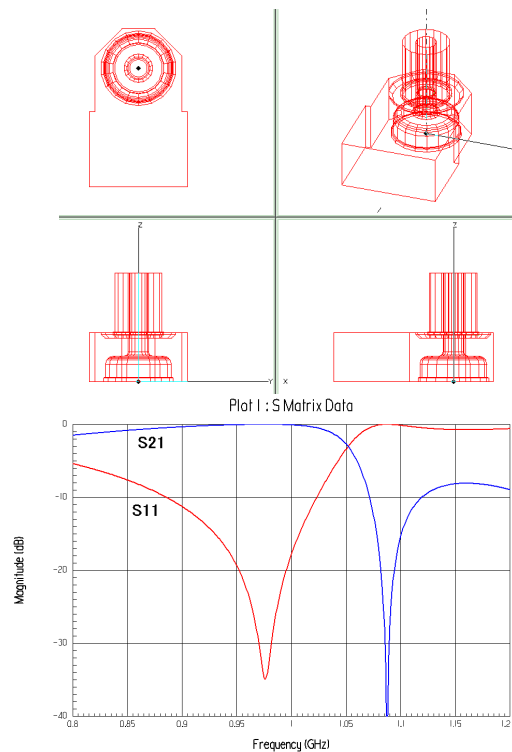


図 4 : 同軸導波管変換器の周波数特性

4.2 高周波窓

高周波窓は外導体の内径を 120 D とし、図 5 に示すようにセラミックスの両側に深さ 18 mm のチョーク構造を有する。チョーク先端部とセラミックスとの間のギャップは、そこでの電界強度を少しでも緩和できるように 3.5 mm とした。セラミックス円板は、純度 95% のアルミナから製作され、その寸法は厚さ $7. \text{ mm}$ 、内径 32 mm 、外径 136 mm であり、真空側表面のみ窒化チタン処理が行われた。図 5 に、設計された寸法形状での高周波窓の周波数特性を示す。972 MHz での VSWR の設計値は 1.15 である。

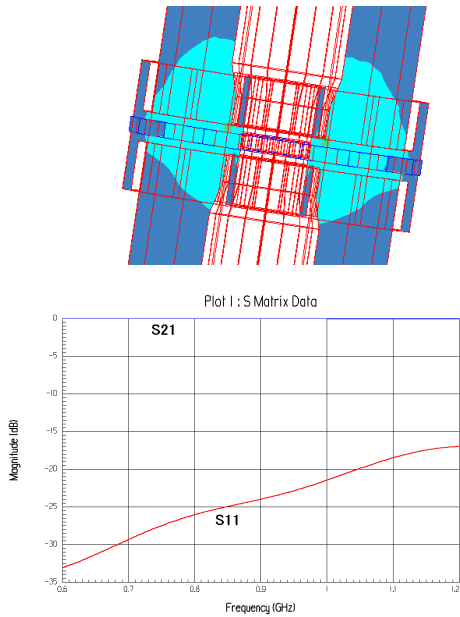


図5：高周波窓の周波数特性

4.3 結合導波管

入力結合器を真空容器に取り付け、大電力試験を行うための機器が結合導波管である。図6に示すように、WR975導波管に $\phi 80$ の入出力用ポートを開けて、2本の入力結合器を設置する。2本の入力結合器間の距離、導波管を短絡する背板の位置、アンテナの突き出し量をパラメータとして計算を行った。2本の入力結合器間の距離を300mmとすると、周波数特性に示されるように972MHzで3番目の共振モードとなり、この時のVSWRは1.05である。

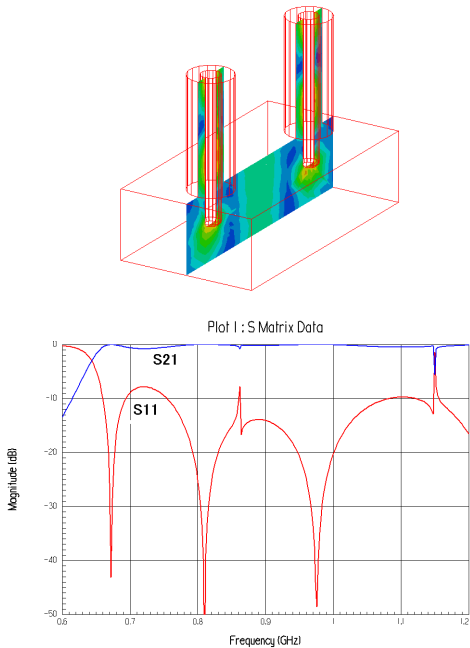


図6：結合導波管の周波数特性

4.4 大電力試験

972MHzクライストロンを高周波源として、サーキュレーター、ダミーロード、WR975導波管などの大電力伝送回路に、図7に示すような入力結合器用テストスタンドを設置して、大電力試験が行われる。整合負荷時に、パルス幅 $\sim 3\text{msec}$ で350kW以上の通過電力の達成を目標としている。

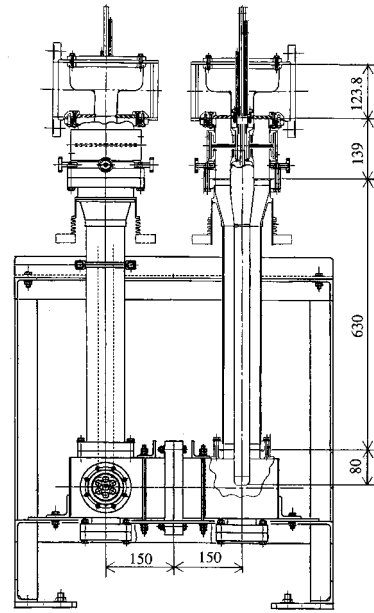


図7：972MHz入力結合器用大電力試験装置

5. まとめと今後の予定

電磁界計算コードを用いて、972MHz超伝導空洞に必要なとされる入力結合器の仕様および寸法形状が決定された。また、設計された入力結合器用各機器の製作はすでに完了し、テストスタンドでの大電力試験の準備が現在進行中である。

謝辞

本論文の高周波入力結合器の製作に関して、古河電工(株)の川口穰氏、(株)東芝の矢野充教氏、三菱重工(株)の仙入克也氏に多大なご協力をいただきました。また、有意義な議論をしていただいた統合計画-超伝導空洞グループの関係者各氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] E. Kako, "Cell-shape Design of 972MHz Superconducting Cavity for High Intensity Proton LINAC", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, Japan, July 12-14 (2000) p323-325.
- [2] S. Noguchi, E. Kako and K. Kubo, "Couplers - Experience at KEK", Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, Aug. 14-18 (1989) p397-412.