

# 低熱膨張材を用いた C-Band RF パルスコンプレッサーの開発

吉田 光宏<sup>1,A)</sup>、松本 浩<sup>B)</sup>、新竹 積<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 東京大学素粒子物理国際研究センター

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

<sup>B)</sup> 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

<sup>C)</sup> 理化学研究所播磨研究所

〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1

## 概要

極低熱膨張材であるスーパーインバーをマイクロ波蓄積空洞の母材として用いた RF パルスコンプレッサーの開発を行っている。RF パルスコンプレッサーは常伝導の加速器コンポーネントの中では最も高い Q 値を持つ空洞が必要なデバイスであり、温度変化に敏感である。このような高い Q 値の空洞に対して温度安定化や冷却機構を簡略化するための手段としては、熱膨張率の低い材料を使用するのが最も有効である。現在、スーパーインバーを用いた数百 MW の大電力対応の RF パルスコンプレッサーと、その試験に必要な RF コンポーネントを開発し、大電力試験を行う。

## 1. 設計

### 1.1 電気設計

現在開発している C-band パルスコンプレッサーは、リニアックのマルチバンチ運転に対応するため 3 セル結合型空洞<sup>[2]</sup>を採用し、フラット出力パルスでの電力効率が最大になるように最適化した形状である。また定格電力は入力 100MW、出力 350MW、50pps である。図 1 左に規格化したパルスコンプレッション入出力電力をシミュレーションした波形を示す。

パルスコンプレッサーを構成する空洞は、第一及び第三空洞を TE<sub>01,15</sub> モードで、第二空洞を TE<sub>01,5</sub> モードで共振するように設計した。これらの空洞の無酸素銅での理論的な Q 値は、それぞれ 185400 及び 82600 になる。

### 1.2 熱設計、機械設計

マイクロ波エネルギーは主に第三空洞に蓄積されるため、エネルギー増倍率は第三空洞の性能の影響を顕著に受ける。この第三空洞の寸法変化に伴う共振周波数のずれは、円筒部の長さ L に対して  $f/L=10.8\text{kHz}/\mu\text{m}$ 、直径 に対しては  $f/d=6.6\text{kHz}/\mu\text{m}$  である。

図 1 右は第三空洞の共振周波数が入力マイクロ波の周波数から  $f$  ずれた場合の、エネルギー増倍率

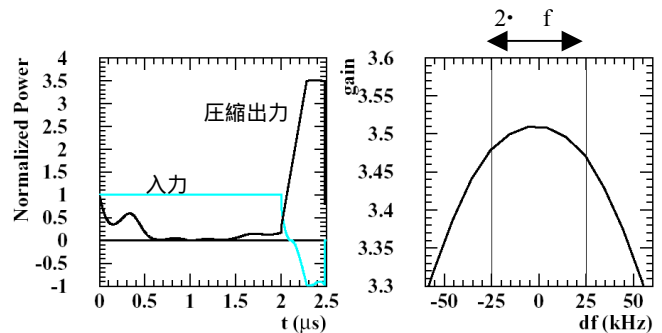


図 1：出力波形と第三空洞の共振周波数のエラーに対するエネルギー増倍率の低下

の低下を示したものである。設計の 99% の出力を得るためには、第三空洞の周波数のずれ  $f$  に対して  $\pm 25\text{kHz}$  以下が要求される。これは円筒部の長さ L に対して  $L=2.3\mu\text{m}$  に相当する。この条件を満たすには銅を使用すると 0.3 の温度制御が要求され冷却方法は容易では無い。そこで空洞の円筒部母材に極低熱膨張材であるスーパーインバーを用いる事を考えた。

表 1 に銅と極低熱膨張材であるスーパーインバー (Fe:63%, Ni:32%, Co:5%) の物性的な特性を示した。スーパーインバーの熱膨張係数は銅の 1/40 であり、全てこれに置き換えれば、理想的には 10 以上の温度変化が許される事になる。従ってこれを空洞母材として使用すれば大幅な温度安定化が見込める。

また高い Q 値を得るためには、空洞内壁は電気伝導度の高い銅である必要があるため、スーパーインバー円筒内壁に PR 電鍍法や HIP により高純度の銅壁を形成する事で解決する。

	銅	スーパーインバー
熱膨張係数	大: $16 \times 10^{-6}/$	小: $0.4 \times 10^{-6}/$
電気伝導度	良: $1.7 \times 10^{-8} \text{ m}$	悪(銅電鍍等で解決)
熱伝導度	良 $394 \text{ W}/(\text{m}\cdot)$	悪 $13.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot)$

表 1. 銅とスーパーインバーの物性的特性

熱負荷に関しては、第三空洞での壁電流による電力消費は 1 パルス当たり 25J で、このうち円筒部が 38%、端板でそれぞれ 31% である。50pps にて運転できるように熱負荷を見積もると、円筒部での熱負

<sup>1</sup> E-mail: sensha@c-band.kek.jp

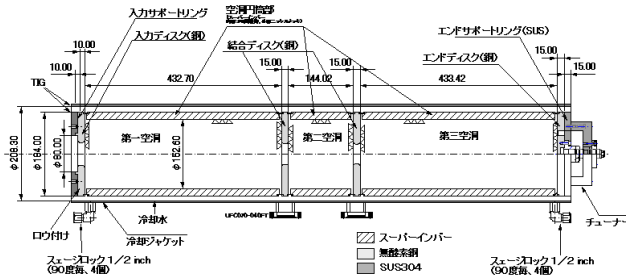


図2：RFパルスコンプレッサー全体図

荷は  $2.2\text{kW/m}^2$  となる。スーパーインバーの熱伝導率は非常に悪い( $13.5\text{W/m}\cdot\text{K}$ )が、この熱負荷でも内壁と3程度の温度差であり、これによる周波数変化は問題無い。

端板に関しては熱伝導率の問題から、銅を用いる事が望ましい。従って端板のみは温度により寸法変化する。前回試作した試験空洞では、円筒部と端板を電子ビーム溶接によって接合していたため、この端板の熱膨張による変形が問題となった。そのため設計を変更し、円筒部と端板をステンレス製の1mm厚の薄いリングで結合する事で端板の熱膨張による影響を回避する事にした。これにより接合方法は、このSUSリングと銅端板をロウ付けし、その後円筒部とのTIG溶接が可能になり、接合も簡便になった。

## 2. 製造

### 2.1 スーパーインバー円筒母材

円筒部の母材となるスーパーインバー材料は鍛造材を用いる事とした。

鍛造品を用いたのは、鍛造低熱膨張材の研究開発を行っている日本鍛造(株)の協力が得られた事と、直接円筒形状の物が得られるため少量ロットでも低価格で生産できるからである。

通常の鍛造品は鍛造品と比較すると不純物や欠陥が多く、電気メッキや真空特性に関して問題がある。しかし同社の尽力により、今回使用した鍛造品は、大気溶解ではあるが、低カーボンで純度が高く、欠陥も少ない。真空でのガス放出量を測定した結果、鍛造材と同じオーダーになっている事が確認できた。

### 2.2 内面銅壁(PR銅電鍍法による)

近年三菱重工(株)により開発されたPR銅電鍍法<sup>[3]</sup>により形成される銅壁は、純度が高いため電気伝導率が非常に高く、真空放出ガス特性も優れている。そのため今回のように非常にQ値の高い空洞に用いる事ができるようになった。

また空洞のマイクロ波モードは  $TE_{01}$  モードであり空洞表面には旋盤の引き目方向にしか電流が流れないため、電鍍後の加工は普通旋盤にてダイヤモンドでの切削による仕上げで十分であると判断した。これにより銅壁の厚さ0.3mm、表面粗度1s以下に仕上げ、無酸素銅を使用した場合の理論値(IACS:102%)の99%程度のQ値(=184500)を得る事ができた。

また熱負荷に対する耐久性試験のために、電鍍したサンプルを加熱して剥離試験を行ったが、少なくとも200までは接合が保たれる事を確認した。

なお銅電鍍の前処理や施工に関しては、三菱重工(株)の壁谷氏の貴重な意見を参考にさせて頂いた。

### 2.3 内面銅壁(HIP法による)

黒木コンポジット(株)の助力により、図3のようなHIP(熱間等方加圧)による銅・スーパーインバー・銅の3重管の製造を行う事ができた。HIPは量産効果の望める方法であり、また拡散接合は表面欠陥にも影響されず強固である。従って全体を一度にロウ付けできる可能性も検討できる。

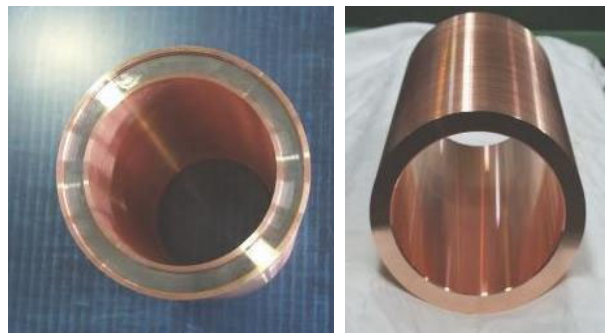


図3：HIPによる銅・スーパーインバー3重管

今回の接合では800, 1000気圧、2時間のHIPを行った。問題は、スーパーインバー材のキュリー点を越えて加熱するため熱膨張率に影響が出る事である。そこで、HIP後の材料の熱膨張率を測定したところ、 $0.82 \times 10^{-6}$ という値が得られ、多少の膨張率の増加が見られたものの、依然、銅の1/20であり問題ない範囲であった。なおHIP後に加熱急冷などの熱処理を行えば元の熱膨張率に戻る事は既に試験を行い実証したが、急冷による歪みや剥離の可能性は否めない。

### 2.4 $TE_{01,5}$ 試験空洞による評価

端板の熱膨張による影響を回避するため、端板と円筒の間には薄いSUSリングを挟む構造とした。この新しい接合方法の評価をするため、図4の $TE_{01,5}$ 試験空洞を製造し共振周波数の温度による影響を測定した。

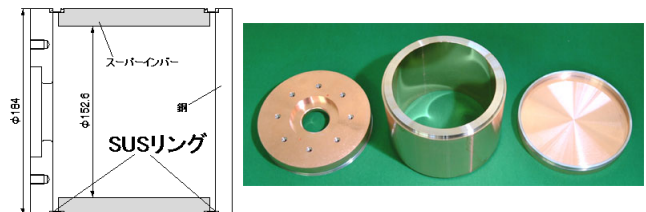


図4： $TE_{01,5}$ 試験空洞

スーパーインバー材は非常に熱伝導率が悪く、端板のみの急速加熱によって、端板のみの影響が測定

できる。結果として片端板のみの加熱では  $-8\text{kHz/}$  という非常に小さい値を得、端板の熱膨張による影響は非常に小さくできた事が検証できた。なお、この値は、端板と円筒の間にある SUS の長さ  $10\text{mm}$  のリングの熱膨張にほぼ合致している。

また今回試作した空洞のモードは  $\text{TE}_{01,5}$  であり、パルスコンプレッサーに使用する主蓄積空洞の  $\text{TE}_{01,15}$  モードでは、端板からの周波数に与える影響はこの値のさらに  $1/3$  になる。従って  $\text{TE}_{01,15}$  空洞では、両端板からの影響を換算し、さらにスーパーインバー円筒部の熱膨張率が銅の  $1/20$  と仮定した場合  $9.18\text{kHz/}$  となるはずである。この値は、全て銅で製造した従来の空洞の  $1/10$  の周波数変化である。

### 3 . 大電力試験装置

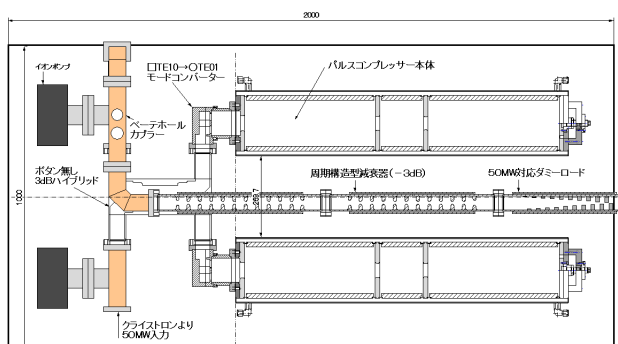


図 5 : 大電力試験セットアップ

#### 3.1 構成

図 5 にパルスコンプレッサーの大電力試験のセットアップ図を示した。パルスコンプレッサー本体 2 台の他、この大電力試験のために  $\text{TE}_{10}$   $\text{TE}_{01}$  モードコンバーター 2 台、ボタン無しハイブリッド 1 台、周期構造型減衰器 2 台、タミーロード 1 台の開発を行ってきた。

#### 3.2 モードコンバーター

$\text{TE}_{10}$   $\text{TE}_{01}$  モードコンバーターは 4 ホール結合型を大電力用に再設計し、コールドモデルで電気設計の確認を行った後、図 6 のような大電力モデルの製造を行った。

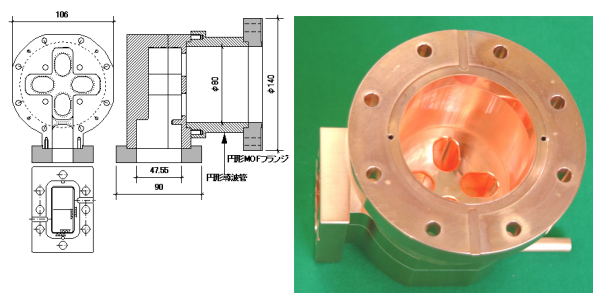


図 6 : モードコンバーター大電力モデル

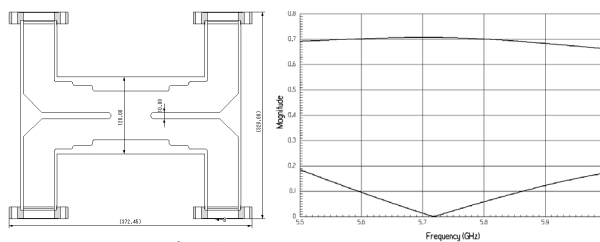


図 7 : 新型ハイブリッド

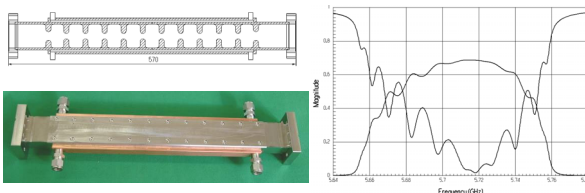


図 8 : 周期構造型減衰器(-3dB)とその特

#### 3.3 新型ハイブリッド

従来の  $3\text{dB}$  ハイブリッドは分岐比を半分に調整するためのボタンが中央部に存在した。しかしハイブリッドの位相条件を満たしつつ、分岐比がちょうど半分になる結合ホールの幅を数値計算で求める事ができた。これにより図 7 のような無調整の非常に簡単な形状のハイブリッドを製造する事に成功した。

製造したハイブリッドを RF 測定した結果、分岐比はそれぞれ  $-3.07\text{dB}$ 、 $-3.08\text{dB}$  で、位相差は  $89.9^\circ$ 、及びアイソレーション  $-40\text{dB}$  が得られ、製造も簡単で、帯域も広く使い易い物が実現できた。

#### 3.4 周期構造型減衰器

パルスコンプレッサーからの RF 出力は今回予定している試験でも  $200\text{MW}$  近い。しかしマイクロ波吸収体の許容最大電力は限られており、このような大電力を直接吸収体で吸収しようとするとは非常に大掛かりな装置が必要になる。

そのため加速管の設計方法を応用し、図 8 のような方形  $\text{TE}_{101}$  モードの周期構造型減衰器(-3dB)を製造し、大電力試験を行った。その結果  $40\text{MW}$ 、 $2.5\mu\text{s}$ 、 $50\text{pps}$  で問題無く動作し、積分消費電力としても問題無い事が実証された。

### 4 . 現状と今後

大電力試験に必要なコンポーネントがほぼ完成した。本体 2 台の製造の最終段階に入っており、すべてがそろそろ 9 月頃には大電力試験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] <http://c-band.kek.jp>
- [2] T.Shintake et al., "A New Pulse-Compressor Using Multi-Cell Coupled-Cavity System", EPAC96, Sitges, June 10-14, 1996, KEK Preprint 96-71.
- [3] K.Tajiri et al., "大型ハドロン計画における P R 銅電鍍法適用技術", 第 25 回リニアク技術研究会