

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^{1,A)}、新竹 積^{B)}、松本 浩^{B)}

^{A)} 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

^{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

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。

近年、銅電鍍技術の進歩により、電鍍層を無酸素銅と同等の性能の高純度銅にする事ができるようになり、このような高い Q 値が必要なデバイスにも銅メッキ空洞を用いる事ができるようになった。

今回の開発は、この高純度銅メッキをスーパーインバーの内面に施して、マイクロ波空洞の温度安定化や冷却機構の簡略化を図り、飛躍的な性能向上を目指すものである。また、この温度安定化によりさらに高い Q 値の空洞制作の可能性を示すものである。

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 セル結合空洞型^[2]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。また設計電力は入力 100MW、出力 350MW である。図 1 左に規格化した入力に対する出力電力を等価回路により過渡シミュレーションしたものを示す。

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_{01,15} モードで、第二空洞を TE_{01,5} 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。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。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 Δf ずれた場合の、エネルギー増倍率の低下を示したものである。

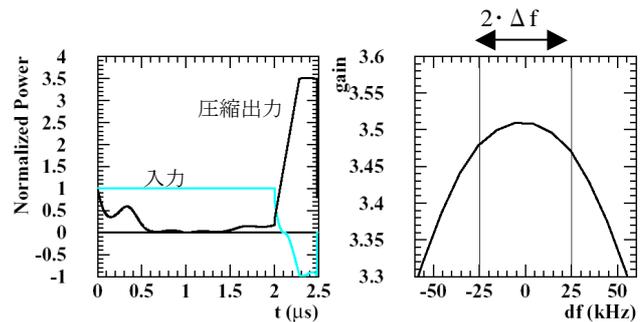


図 1：出力波形と第三空洞の共振周波数にのエラーに対するエネルギー増倍率の低下

1.2 熱設計

今回の設計で熱膨張に対して最も敏感に影響を受ける部分は第三空洞 (TE_{01,15}) である。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 $\Delta f / \Delta L = 10.8 \text{ kHz} / \mu\text{m}$ 、直径 ϕ に対しては $\Delta f / \Delta \phi = 6.6 \text{ kHz} / \mu\text{m}$ である。また図 1 右から分かるように、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 Δf に対して 25kHz 以下が要求される。これは円筒部の長さ L に対して $\Delta L = 2.3 \mu\text{m}$ に相当する。この条件を満たすには銅を使用すると 0.3°C の温度制御が要求され冷却が難しい。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°C 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。しかし空洞内壁は電気伝導度の問題から銅である必要があるため、スーパーインバー円筒に高純度の銅メッキを施す事で解決する。

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

表 1：銅とスーパーインバーの物性的特性

¹ E-mail: sensha@c-band.kek.jp

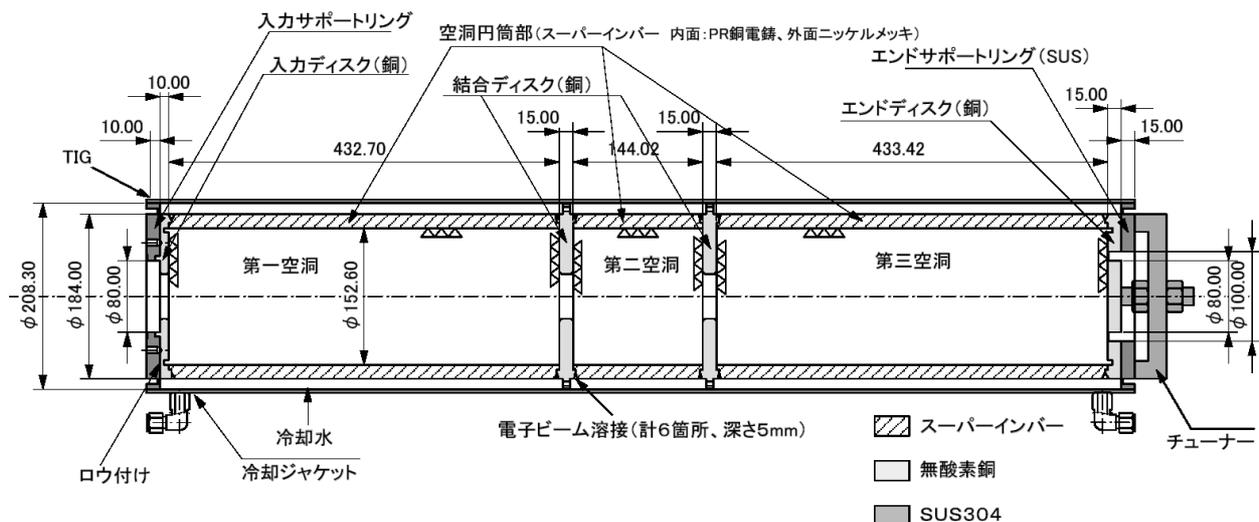


図2：RFパルスコンプレッサー全体図

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 運転できるように熱負荷を見積もると、円筒部での熱負荷は 2.2kW/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°C 程度の温度差に抑えられ、これはスーパーインバーの熱膨張率では問題になら無い。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事になるが、円筒部の長さ比べ径に対する寸法変化は共振周波数への影響が少なく、また銅はスーパーインバーに比べ柔らかく円筒部に与える力学的影響は少ないため、冷却効率を上げる事で十分と判断した。

1.3 機械設計

図2のように、空洞の円筒部の母材としてスーパーインバーを使用し、その内面にPR銅電鍍を施す。端板は冷却効率を考慮して無酸素銅板を使用し、円筒部とは電子ビーム溶接により接合する。また第三空洞は共振周波数に対する要求が厳しいため、初期調整用のチューナーを取り付ける。冷却に関してはジャケット方式で行う事とした。

2. 製造、諸試験

2.1 スーパーインバー円筒母材

マイクロ波蓄積空洞の円筒部の母材としては铸造によるスーパーインバーを用いる事とした。

铸造品を用いたのは、铸造低熱膨張材の研究開発をしている日本铸造(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。図3は铸造時に高周波炉から溶解したスーパーインバーを取り出している所である。



図3：スーパーインバー铸造

通常の铸造品は一般に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。これらの問題を回避するために、铸造は大気溶解ではあるが、低カーボンで純度が高く、欠陥も少ない物を使用した。

ただし、铸造材を超高真空機器に使うのは初めての経験である。内壁表面は銅電鍍で覆われるのでスーパーインバー材は直接真空には露出しないが、経年変化で母材の不純物が真空の悪化を招く可能性はあると考えられる。そこで、あらかじめ材料自体の真空試験を行った。真空試験は、 $\text{TE}_{01,15}$ の円筒型空洞とほぼ同等の大きさの空洞を用い、内壁を電解複合研磨で鏡面仕上げを行った。また測定は SUS304 の同形状、同内面処理の空洞と対比した。結果、24時間 200°C のベーキング後のガス放出量が、SUS304 で $6.2 \times 10^{-9} [\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s/m}^2]$ に対してスーパーインバーで $2.6 \times 10^{-8} [\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s/m}^2]$ となり、铸造プロセスにより製造した物としては十分に低い事が確かめられた。

2.2 銅電鍍

近年、三菱重工(株)により開発されたPR銅電鍍^[3]は電気伝導が非常に高く、真空放出ガ斯特性も優れているので、今回のようにQ値の非常に高い空洞内壁にも電鍍を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TE₀₁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 接合

スーパーインバーと銅とでは熱膨張率に大きな差がある事から、接合は熱入力の小さい電子ビーム溶接を用いた。できる限り収縮を小さくするために、溶接は幅1mm、深さ5mmとした。この電子ビーム溶接時の周りの温度変化は数十℃程度で、熱負荷による歪みは問題にならない。

また、空洞のベーキングを考慮して、同径の銅板とスーパーインバー円筒の試験片を電子ビーム溶接した物を200℃まで昇温し、真空リーク試験を行ったが、溶接箇所からの真空漏れは検出されなかった。

3. TE_{01,15} テスト空洞

製造プロセスの試験のため、TE_{01,15} シングルセルによるパルスコンプレッサーのコールド真空モデルの試作を行った。図4に概略寸法図と制作した試験空洞の接合前の概観を示す。右端は方形導波管から

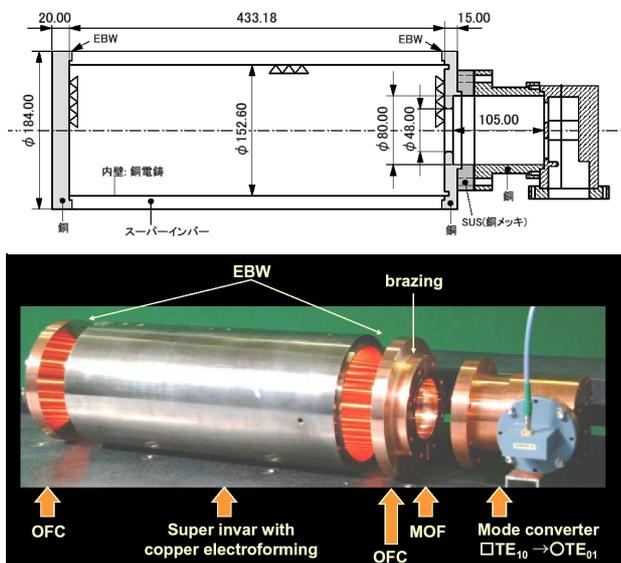


図4：TE_{01,15} テスト空洞

円形のTE₀₁モードへの変換器で、これと蓄積空洞の間には専用の内径80の円形MOFフランジ^[4]を使用した。接合はフランジと端板のロウ付後、円筒部と電子ビーム溶接を行った。

表2に、空洞の電氣的な設計値と実測値を示す。電子ビーム溶接による収縮が、事前のテストピースによる評価よりも大きかったため、中心周波数に若干のずれがあるが、基本的には設計通りである。

	設計	実測
β	9.0	8.7
Q_0	185400	184500
f_0	5712.00MHz	5712.56MHz

表2：TE_{01,15} 空洞の特性

制作した空洞にパルスマイクロ波を与えた時の圧縮出力を図5左に示す。実測とシミュレーションは非常に良く一致しており、電氣的に設計通りである。

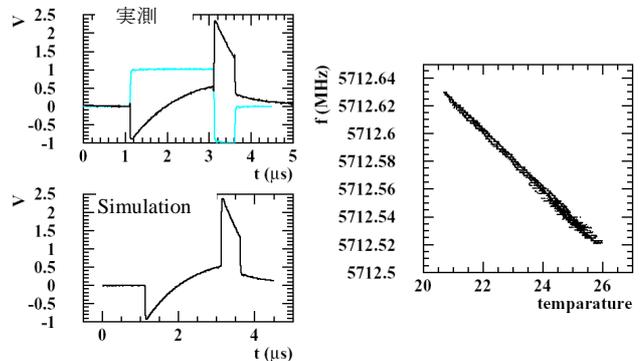


図5：パルス圧縮と共振周波数の温度依存性

共振周波数の温度依存性は、室温付近での微小な変動が知りたいため、気温の変化による真空での共振周波数の変動を調べた。図5右に示したように、 $\Delta f / \Delta T = 20 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ で銅の1/4程度である。これは通常の低熱膨張材と同程度ではあるが、スーパーインバーという極低熱膨張材の性能は出ていない。原因は端板の銅の熱膨張による歪みと考えられ、端板は多少温度制御を厳しくする必要があると思われる。

また真空放出ガスについてはベーキング前で $4.8 \times 10^{-8} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2]$ であり、放出ガスは十分少ない。

4. 現状及び今後

C-band パルスコンプレッサーの実機を製造中である。铸造の技術は確立し、ほぼ無欠陥の铸造スーパーインバー材が得られるようになった。今年中にハイパワー試験を行う予定で進めている。

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PR銅電鍍法適用技術", 第25回リニアック技術研究会
- [4] H.Matsumoto et al., "ビームインピーダンスのない新型・真空フランジの開発", 第24回リニアック技術研究会