

低熱膨張材を用いたC-band RFパルスコンプレッサーの大電力試験

吉田 光宏^{1,A)}、松本 浩^{B)}、新竹 積^{C)}

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

C) 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なった。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の簡略化を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。今回、スーパーインバーを用いて数百MWの大電力対応のRFパルスコンプレッサーを開発し大電力試験を行なった結果について述べる。

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^[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_{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。

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。

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。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 $\pm 25 \text{ kHz}$ 以下が要求される。これは円筒部の長さLに対して $\Delta L = 2.3 \mu \text{ m}$ 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。

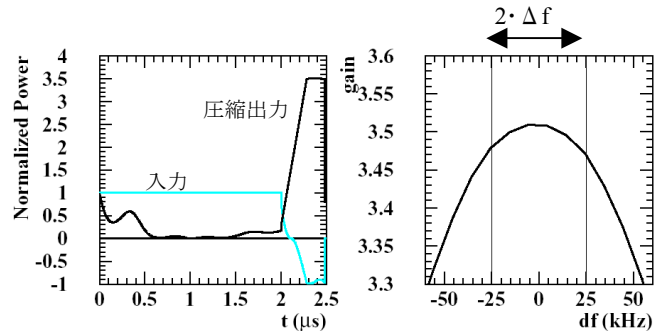


図1: 出力波形と第三空洞の共振周波数のエラーに対するエネルギー増倍率の低下

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。

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、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: $16 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ | 小: $0.4 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ |
| 電気伝導度 | 良: $1.7 \times 10^8 \Omega \text{ m}$ | 悪(銅電鍍等で解決) |
| 熱伝導度 | 良 $394 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ \text{C})$ | 悪 $13.5 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ \text{C})$ |

表1. 銅とスーパーインバーの物性的特性

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

図2は空洞の円筒部にスーパーインバーを使用したパルスコンプレッサーの全体図である。ここで端板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してしまう。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、接合も簡便になっている。

¹ E-mail: sensha@c-band.kek.jp

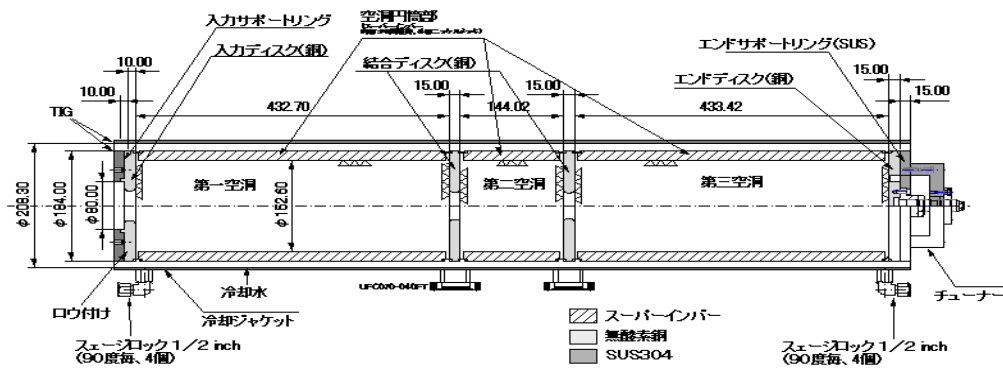


図2: RFパルスコンプレッサー全体図

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鋳造材を用いる事とした。

鋳造品を用いたのは、鋳造低熱膨張材の研究開発を行っている日本鋳造(株)の協力が得られた事と、鋳造という方法により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。

通常の鋳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、今回使用した鋳造品は、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^[3]により形成される銅壁は、純度が高いため電気伝導が非常に高く、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。

接合は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、 0.82×10^{-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で実証したが、急冷による歪みや剥離の可能性があり、今回は熱処理を行わなかった。

2.4 組み立て

空洞調整加工・TIG溶接による接合・水冷ジャケット取り付け等の最終工程は(株)トヤマにおいて行った。(株)トヤマは超高真空機器専門メーカーであるため、組み立ての作業環境も良く、また機械加工の設備も一通りあるため、RF測定⇄調整加工⇄洗浄⇄TIG溶接という流れを迅速に行う事ができた。図3が、こうして完成したパルスコンプレッサーの外観である。

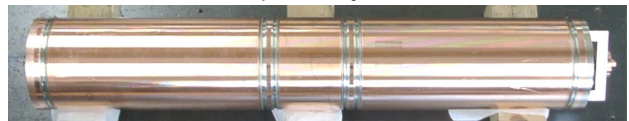


図3: パルスコンプレッサーの外観

今回制作したパルスコンプレッサーは3セル結合空洞型であり、第一及び第二空洞には周波数調整機構を付けていない。さらに今回の組み立てでは、接合方法としてTIG溶接を用いたため、溶接による縮みを考慮した周波数調整が最大の課題であった。溶接による縮みについてはテスト空洞や実機の片側端板を溶接して測定した結果60μm~90μmの間で、溶接状況等により変化があり、繰り返し精度が要求精度(<±10μm)を満たさない。そこで溶接箇所とは別の部分を、TIG溶接機の電流をコントロールして、溶接より少ない熱量で溶かし、この熱収縮で共振周波数の最終微調整を行なった。

2.5 性能

表2に製造した2台のパルスコンプレッサーの電気的特性の最適設計値との比較を示した。これらの電気特性によれば目標の95%以上の出力は得られるはずである。

| | 設計値 | 1台目 | 2台目 |
|------------------|---------|---------|---------|
| 第一空洞共振周波数 | 5712.00 | 5712.21 | 5712.05 |
| 第二空洞共振周波数 | 5712.00 | 5711.88 | 5711.93 |
| 第三空洞共振周波数 | 5712.00 | 調整可 | 調整可 |
| 結合定数(k_{12}) | 0.0012 | 0.00112 | 0.00114 |
| 結合定数(k_{23}) | 0.00069 | 0.00059 | 0.00075 |
| Q_L | 32 | 27 | 29 |

表2: 電気的特性

また温度に対する共振周波数の変化は、13kHz/°Cという値が得られた。これは通常の銅の空洞と比べると1/6以下という十分小さな値であり、温度変化に対して非常に安定な空洞であると言える。

3. 大電力試験

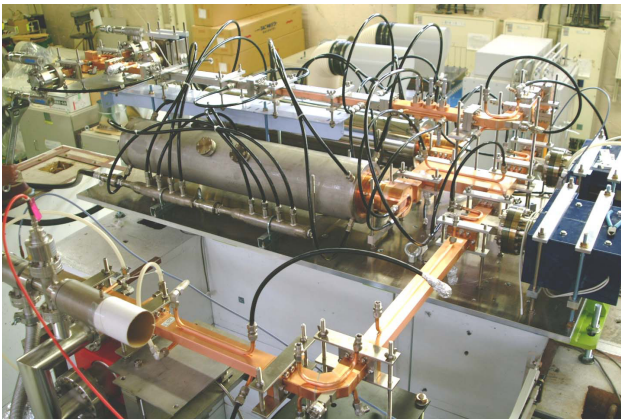


図4: 大電力試験

3.1 構成

図4はパルスコンプレッサー大電力試験の様子である。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□TE₁₀→○TE₀₁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台等の開発を行った。また真空ポンプはエージングを考慮してイオンポンプを4台設置した。

これらの新しく製造したマイクロ波コンポーネントについては、パルスコンプレッサーの大電力試験に先立ち、今年の初頭にパルスコンプレッサーを除いた状態で40MWまでの大電力マイクロ波でのエージングを行ない問題がない事を確認した。

3.2 現状

現在マイクロ波電力を入力し始めてから1ヶ月が経過した。現時点で図5のように入力30MW、2.5μsに対して200nsの平坦出力で90MWが得られている。

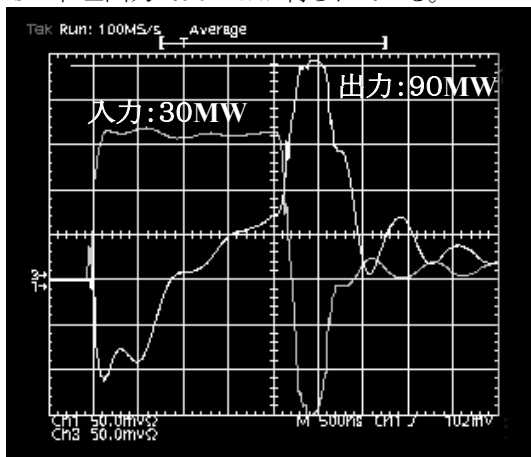


図5: パルスコンプレッサーの入出力RF

3.3 問題と今後

- 周波数のずれによるゲインの低下
大電力試験装置にパルスコンプレッサーを取り付けた後、周波数特性を測定した所、サイドバンド(0-mode及びπ-mode)の周波数が400kHz程ずれている事が確認された。これは空洞の長さ方向の変化に換算すると40μm程度である。このずれにより目標ゲイン3.5に対して、現状では3.0程度の圧縮ゲインに留まっている。
この周波数のずれの原因は現時点では断定できないが、入力端版に直接付いているフランジを強く締めた事によるフランジの歪みの可能性が高いと思われる。現在フランジをさらに外から引っ張るための治具を準備中である。将来的に増産する際にはフランジをもっと厚くする等の対策を要すると考えている。

- 放電
現在ピーク出力電力で100MWを超えた所であるが、ピーク出力電力が数十MW付近から放電による真空悪化が頻繁になり、エージングに時間がかかっている状況である。

この放電の原因を究明するためには低エネルギーのX線を観測できる検出器が必要である。今回はNaIシンチレーター2台を試験装置に設置し、放電時のX線の発生状況をモニターした。結果として現状で最もX線強度の高かったのはベータホール方向性結合器であったが放電箇所を断定するには至っていない。なお、このベータホール方向性結合器に関しては、減衰器の後に接続する等という改善策がある。なお方向性結合器に限らずこれらのデバイス全てが、このような大電力を入力するのは初めての事であり、現在徐々に出力電力も上がっているため、もうしばらくエージングを続けた後に、どこまでのパワーを入力できるか判断する必要がある。

4. まとめ

極低熱膨張材であるスーパーインバーを用いたパルスコンプレッサーを製造し、温度に対する共振周波数の変化を13kHz/°Cに抑える事に成功した。またこのパルスコンプレッサーの大電力試験を行い、現在ピーク出力で100MWを越えた所である。今後さらにエージングを続けると共に今から改良を加えられる部分には改良を加え今回の目標出力である出力175MW,220ns,50ppsを目指す。

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