

AUTOMATED HYDROFORMING OF SEAMLESS SUPERCONDUCTING RF CAVITY

Tomohiro Nagata ^{#,A)}, Seiichi Shinozawa^{A)}, Noriyuki Abe^{A)}, Junki Nagakubo^{A)}, Hirohiko Murakami^{A)}
Tsuyoshi Tajima ^{B)}, Hitoshi Inoue^{C)}, Masashi Yamanaka^{C)}, Kenji Ueno^{C)}
^{A)} ULVAC, Inc., 5-9-6 Tokodai, Tsukuba, Ibaraki 300-2635, Japan
^{B)} Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM87545, USA
^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

We are studying the possibility of automated hydroforming process for seamless superconducting RF cavities. Preliminary hydroforming tests of three-cell cavities from seamless tubes made of C1020 copper have been performed. The key point of an automated forming is to monitor and strictly control some parameters such as operation time, internal pressure and material displacements. Especially, it is necessary for our studies to be able to control axial and radial deformation independently. We plan to perform the forming in two stages to increase the reliability of successful forming. In the first stage hydroforming by using intermediate constraint dies, three-cell cavities were successfully formed in less than 1 minute. In parallel, we did elongation tests on cavity-quality niobium and confirmed that it is possible to achieve an elongation of >64 % in 2 stages that is required for our forming of 1.3 GHz cavities.

シームレス超電導空洞における液圧成形のPC自動制御

1. はじめに

超電導空洞の製造方法において、現在主流である方式は、高純度 Nb の板材をプレス加工し、それぞれのパーツを電子ビーム溶接により接合する手法であり、この方式で製作された超電導空洞で高い加速性能も得られている¹⁾。しかしながら、この電子ビーム溶接を用いた方法は、電子ビーム溶接時間の長さもさることながら溶接で生成されたビードを平滑に研磨する工程にも長時間を要し、生産性の観点から見れば製造時間の短縮化が大きな課題として残されている。

近年では、上記のような課題を解決するために溶接ビードの存在しないシームレス空洞の開発も行われており、生産性の向上や低コスト化の実現、さらに、加速特性に関しては最も磁場の強くなる（加速性能に大きく影響する）空洞の赤道部に溶接ビードが存在しないことから高性能化に効果的であることも示唆されている^{2, 3)}。シームレス空洞の製造技術をさらに高めるためには、空洞の成形に関するパラメータ変動を十分に把握し、再現良く効率的に生産されることが要求される。

本研究では、シームレス空洞製造方法の一つである液圧成形法に着目し、LabView によりプログラムを作成して液圧成形機の自動制御化のテストを試みた。初期段階のテストとして、無酸素銅のシームレスパイプを用いて中間段階の液圧成形を行った。ここで中間段階とは、現在採用している液圧成形プロセスは 2 つの金型（中間金型と最終金型）を用いて 2 段階で成形するが、この第 1 段階目の成形工程を

指している。ちなみに、この工程の後にひずみ回復処理としてアニール工程を入れ、その後、最終成形を行い所定の形状のシームレス空洞を得る。

シームレス空洞の成形では元のパイプの状態から大きな変形を伴うことから材料の伸び特性が非常に重要なパラメータとなる。また、中間段階と最終段階の成形の間にアニール工程を入れることにより、最終段階の成形では初期材料とは異なる伸び特性となるため、この段階での伸び特性を把握する必要がある。そこで、Nb 材について通常の引っ張り試験で伸び特性を評価すると共に、液圧成形工程を模して所定の伸び率で引っ張り試験を中断しアニール工程を入れた後、再度引っ張り試験を行う 2 段階引っ張り試験を実施した。

2. 液圧成形の PC 自動制御化

2.1 シームレス空洞製造方法

ストレートの無酸素銅シームレスパイプ（長さ：660mm、外径：130mm、肉厚：3.5mm）に対して、最初に「くびれ」を入れる絞り工程（ネッキング工程）を行う。ネッキング工程が完了した 3 連セルの形態を図 1 に示す（原理・装置の詳細は参考文献[2]を参照）。ネッキングが完了したパイプは 500°C で 2 時間の真空アニールを実施した。次いで行う液圧



図 1 銅 3 セル用ネッキング後の形状

[#] tomohiro_nagata@ulvac.com

成形は高エネルギー加速器研究機構において開発された装置を用いた(図2)。液圧成形の原理を図3に示す。パイプ長手方向の断面図(半割)を図示している。図3(a)はネッキング後のパイプをセッティングした状態で図3(b)は液圧成形完了後の概略図となっている。また、図中の青矢印はパイプ内に充填されたオイルに内圧を印加していることを示し、赤矢印はパイプの長手方向に縮める方向で圧力を印加していることを表す。このように金型に押し付けることによって所定の形状を得る。

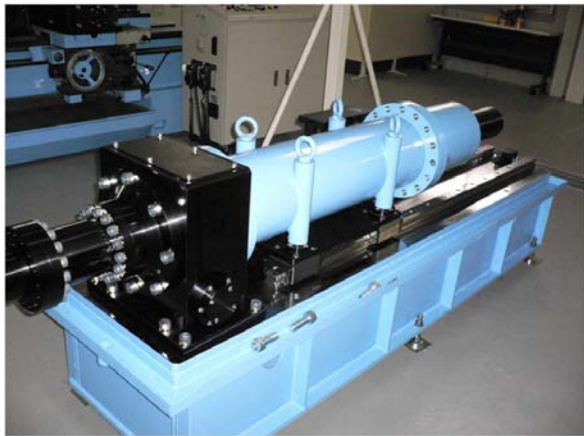


図2 液圧成形装置

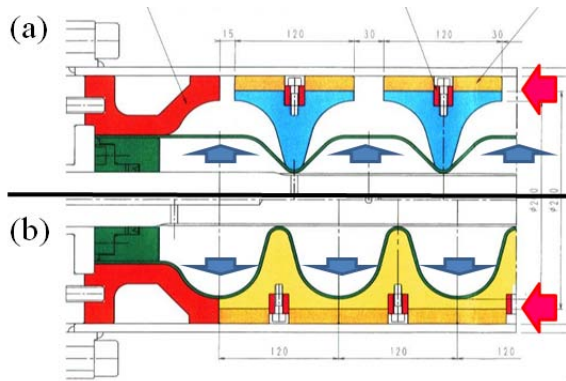


図3 液圧成形の原理図 (a) 成形前、(b) 成形後

2.2 LabViewによる液圧成形自動制御

変位計を取りつけられるように金型を加工し、パイプの径方向と長手方向(軸方向)の変位量、さらには内圧も併せてパソコン上のソフトLabViewで取り込み、モニターできるようになっている。また、従来は手動で行っていた内圧の印加(図3の青矢印に対応)と軸方向への圧力印加(図3の赤矢印に対応)についてもパソコン上でそれぞれ独立に圧力印加時間とインターバルを設定できるように改良を加えた。

以上のような制御を可能としたソフト(図4)を用いて、ネッキングおよび真空アニールが完了した無酸素銅のシームレスパイプについて液圧成形を実施した。

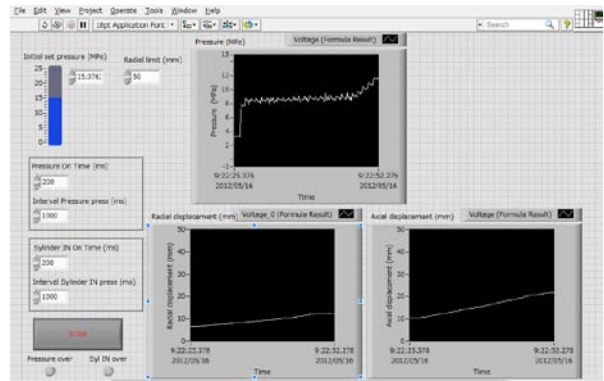


図4 液圧成形制御ソフト

液圧成形の条件としては、パイプ内圧印加時間を400msec、軸方向圧力印加時間を200msec、それぞれのインターバルを1secとしてパルス的に圧力を加えた。ここで、金型直下の部分は金型が軸方向へ移動して閉じる前に径方向に膨らみ切ってしまう(15mm以上変位する)と材料を挟んでしまう恐れがあるので、プログラム上で変位が13mmを超えると一度制御が止まるように設定した。この段階で金型移動量が少ないようであれば軸方向圧力印加を独立に調整することができる。今回は軸方向と径方向の移動量の関係が良好であったのでそのまま圧力印加を再開し径方向に15mm膨らみきったところで終了した。

図5に液圧成形時のパラメータの変化量として内圧そして軸方向および径方向の変位を示す。内圧は時間とともにその増加量がやや緩やかになっていく傾向にある。これはパイプの変形量が次第に少なくなっていくことに起因していると考えられる。また、軸方向および径方向の変化は安定に増加していく。

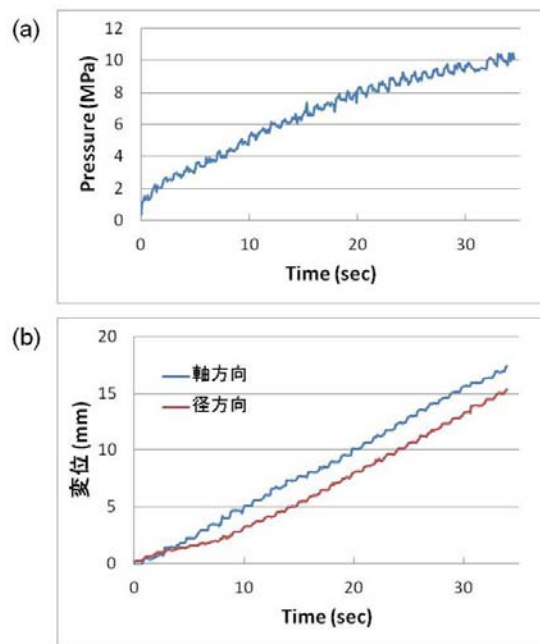


図5 液圧成形で得たパラメータの変動

(a) 内圧変化、(b) 軸方向および径方向の変位

今回の条件で行った液圧成形ではパルス的に圧力を印加した際に、軸方向や径方向におよそ 500 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ で変位していくことがわかった。

液圧成形の完了した空洞を図 6 に示す。破裂や大きな傷は特に無く、材料を金型に挟むようなことも起きず良好な形状の中間成形品を得ることができた。このように中間成形段階ではあるが、30 秒程度で成形が完了し、生産性に非常に優れていることを示唆する結果も得られている。



図 6 中間液圧成形を行った銅 3 連空洞

2.3 液圧成形の今後の展開

今回、初期実験の位置付けとして銅のシームレスパイプに対して中間金型を用いた液圧成形試験を行い、3 連空洞の成形に成功した。今後の展開としては、まずは確実性を上げていくという観点で、繰り返し試験を行うことで成形条件を精査し、より定量的な評価（例えば、圧力を印加した時の軸方向と径方向の変位量の関係など）を見積もっていくことが必要であると考えている。さらに中間成形に成功した空洞は真空アニールを経て最終液圧成形を試みていく。以上のように銅でテストを行い、基礎データを習得した後に Nb を用いた液圧成形に移行する予定である。

3. Nb 材の 2 段階引っ張り試験

ストレートのシームレスパイプから最終液圧成形まで変形する中で、最も変位量の大きい空洞セルの赤道部に必要とされる伸び率は約 64% と見積もられる。しかしながら、現在採用している工程では中間液圧成形後に真空アニールを施しており、ここで組織のひずみが回復されていると考えられるので、通常の引っ張り試験だけでは最終液圧成形まで変形する材料なのか判断することは困難である。そこで今回、実際の液圧成形を模した引っ張り試験を行ない最終的な伸び率を評価した。

電子ビーム溶接タイプの空洞でも用いられている高純度の Nb 板材 (RRR>200、プレアニール：750 $^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$) から引っ張り試験片を 5 つ作製し、そのうち 2 つについては通常の引っ張り試験を行い、3 つは中間液圧成形における最大伸び率とほぼ同等の約 20% 伸びたところで引っ張り試験機から取り出し、750 $^{\circ}\text{C}$ で 4h の真空アニールを施した後、再度引っ張り試験を行った。

これらの引っ張り試験結果を図 7 に示す。通常の引っ張り試験を行った 2 つの試料の伸び率はそれぞれ、55.7% と 56.7% の伸び率を示した。一方、2 段階引っ張り試験を行った 3 つの試料は 65.0%、68.3%、

78.3% の伸び率であり、通常引っ張り試験と比べてアニールを実施した方が全試料とも伸びが向上している。このことは、アニールにより組織のひずみが回復した効果であると言える。また 2 段階引っ張り試験を行った試料は、実際の液圧成形で最大の伸び率となる 64% を超えているので、この材料は成形に成功する可能性が高いと思われる。しかしながら、一枚の板材から切り出した試料で大きなばらつきを示したことは注意を要する。このようなばらつきについては測定上の誤差を精査するために再現性を調べる必要があるが、物理的に意味のある差異とすれば結晶粒子のサイズや方位が不均一であることに起因していると考えられるので、今後、併せて結晶粒に関する評価を行うことでより一層強固な判断材料になり得ると考えている。

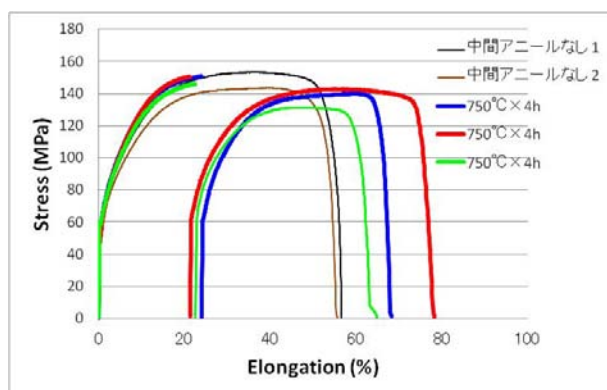


図 7 通常および 2 段階引っ張り試験結果

4. まとめ

液圧成形の工程についてコンピュータ制御を可能にし、無酸素銅のシームレスパイプを用いて 3 連空洞の中間液圧成形に成功した。コンピュータ制御できることにより成形に関わる内圧や変位量といったパラメータを定量的に評価できるようになったので、今後はフィードバックを繰り返すことにより成形条件を最適化し、最終的には Nb へ適用していく予定である。

また、液圧成形のための材料評価として 2 段階引っ張り試験を行い、中間アニールによるひずみ回復効果を確認できた。今後、結晶粒の評価などと併せることで液圧成形の成否判断のための重要な評価方法になると考えている。

参考文献

- [1] <http://ilc.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/>
- [2] 上野健治 他 “超電導空洞のシームレス化に関する装置開発” 第 4 回日本加速器学会プロシーディングス (2007) pp.76-78
- [3] W. Singer “Seamless/bonded niobium cavities”, Physica C 441 (2006) pp.89-94