

Lバンドシームレス空洞の製作

○井上 均、渡邊勇一、上野健治

高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設

機械工学センター

概要

ILC（国際リニアコライダー）用 9 連超伝導空洞（図 1）の製作方法は、Nb の板材をプレス、トリミング加工の後、それぞれの部品を電子ビーム溶接（EBW）により接合して完成する方法が技術的に確立している。しかし、部品加工や EBW による方法は真空引きや溶接後の冷却時間（Nb は高温で酸化性が強い）が必要であり作業時間も長い。それらのことから必ずしも生産性が高いと言えない。また完成した空洞内面の赤道部（空洞最大直径部）に EBW のビードや溶接欠陥等が空洞性能を左右する重要な要因となる。特に空洞内面の裏ビードは突起等が無く滑らかな面が要求され EBW の溶接条件が重要である。これらの表面欠陥は空洞性能の低下の原因となるので空洞内面を機械的な研磨や化学研磨、電界研磨、さらに高圧洗浄等の処理が行われる。高電界が発生する赤道部に電界の方向に直角方向にビードが走っている事は空洞の性能上から存在しないことが望まれる。このような観点から、空洞のシームレス化が可能になれば改善が図れる。また、パイプ状の Cu/Nb のクラッド材を使用する事により、高価な Nb 材を軽減することになりコストダウンも期待できる。このような目的で超伝導空洞のシームレス化の試作を行っている。この開発経過等について報告する。

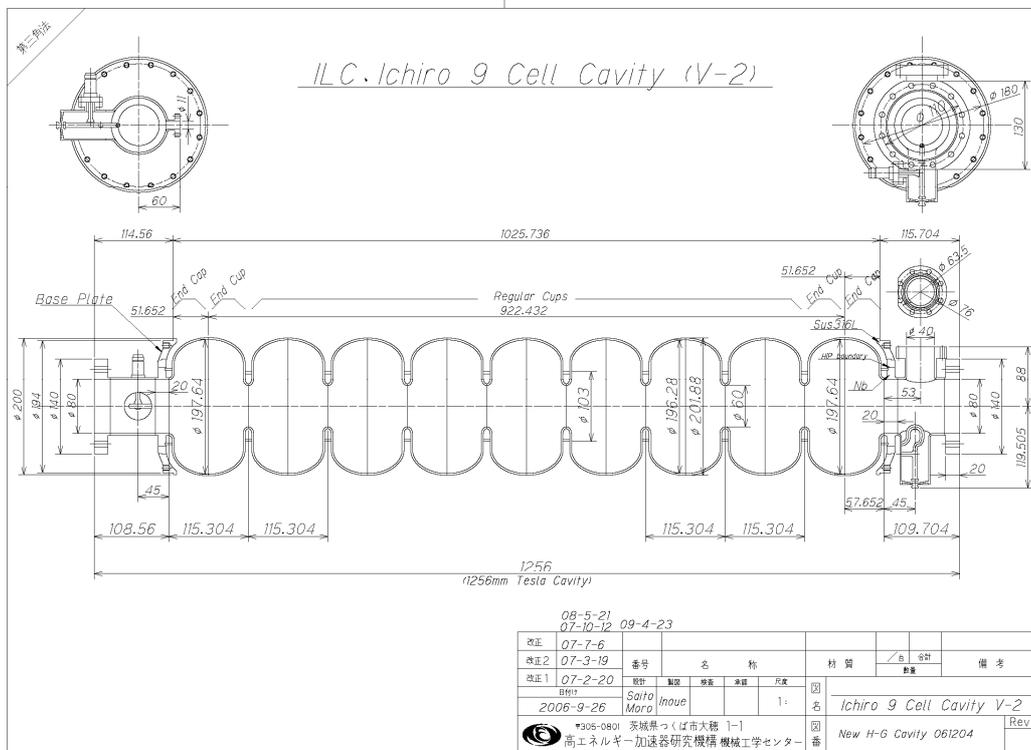
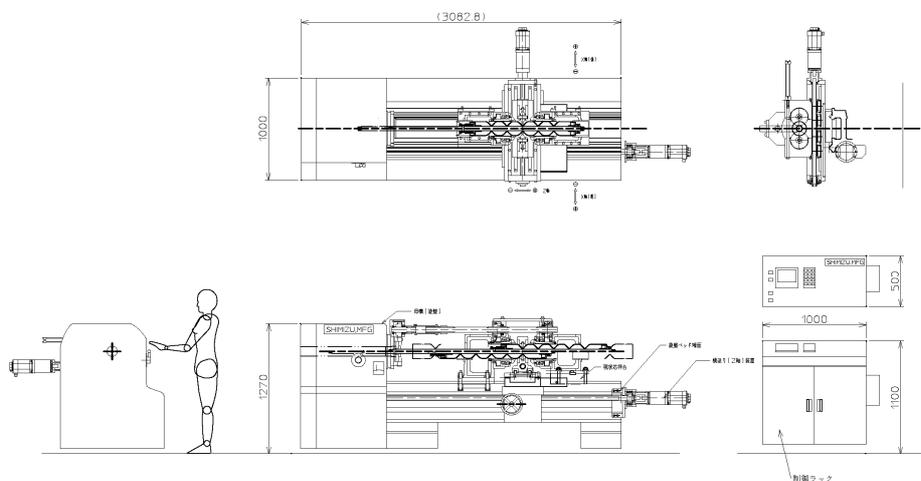


図 1 ILC イチロータイプ 9 連超伝導空洞

1、ネッキング加工

空洞のシームレス化については素材がパイプ形状から始めることを前提に検討した。パイプの径を赤道部

(外径 203mm) とアイリス部 (外径 66mm) の径の中間の径 (外径 130mm) に設定した。これは液圧成時に赤道部の膨らます量を少なくする為である。写真 1 のような汎用旋盤を改造した装置で、パイプを V 溝加工する。両端部分をコレットチャックで掴み、前後にある 2 つのローラーでパイプにくびれた形状を加工できるように 2 軸の NC 装置がついている。また、パイプ中心軸に V 溝加工によるパイプ軸方向に伸びて加工部分が肉薄にならないようにパイプ両端に皿バネで圧力をかけて調整している。パイプを回転 (200min⁻¹) させながら 2 つのローラーで押し付けて変形させる。この方法は冷間加工で温度上昇も少なく材料劣化の問題もない。スピニング技術 (ヘラ絞り) と同じ要領で少しずつ変形させて所定の形にする。現在のネッキング加工条件では銅パイプで溝底部 (アイリス部) の減肉率は 34%、Nb では 13% であった。銅と Nb は比較的に加工性が似ているために、最初に練習を兼ねて銅パイプで行っている。Nb パイプ (φ130 x 800 x 3 t) は高価で日本では入手困難なので 3mm の板を巻いて作っている。シームは EBW で貫通溶接をしている。



ネッキング装置



写真 1 Nb パイプのネッキング加工



写真 2 加工終了

現在のネッキング装置では直径 130mm、長さ 2m のパイプを 10 溝まで加工することが出来る。(写真 3) これは 9 連空洞を 1 本のパイプから作れるように設計されている。現在、ネッキング加工の問題点は加工された裏側の面粗さが非常に粗くなり、加工条件によってはシワのような面が発生する。空洞はパイプ内面の面粗さ小さい事が要求される。特に多連の場合は、アイリス部を機械的研磨で取る方法は困難が予想される。



写真3 銅パイプを使ったネッキング加工



写真4 Nbパイプ

2、液圧成形

銅パイプをネッキング加工後、アニール（500℃、2時間保持）を行う。Nbパイプの場合は750℃、3時間保持、高温での酸化性が強い材料なので KEK 機械工学センターの大型真空炉で処理している。アニールしたパイプに分割できる中間金型（4個）をセットする。パイプ内部に8MPa程度加圧して、径方向の膨らみを観察窓から確認しながら軸方向に金型が密着するまで油圧シリンダーで押し付ける。軸方向の隙間が密着するとパイプの油圧ラインを高圧側（20MPa）に切り替えての金型の全面に密着させる。外径130mmからいっきに202mmまで膨らませられないので、中間金型と称して外径150mmまで膨らまし、再度アニール処理して最終金型を用いて2段階で成形する。パイプの内圧15MPa程度では圧力不足で、金型との間に隙間ができて十分変形しない。赤道部の変形率は中間成形で30.7%、仕上げ成形で18.8%程度行っている。

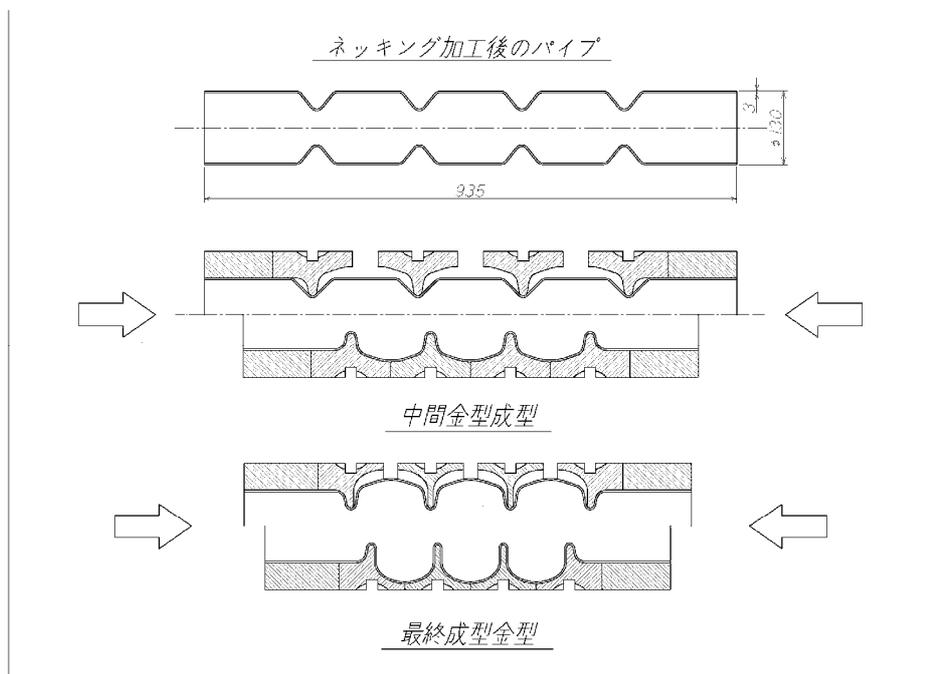


図2 液圧成形加工手順

この方法は成形ペローズを作る方法と良く似ている。筆者が見た範囲で違うのはネッキングを行わないで、パイプ内に水圧をかけながら軸方向に縮めて径方向に膨らませていた。山と谷の幅や直径差が空洞の様に極端ではない。パイプの軸方向に力を加えながら適当な内圧をかけることで赤道部の肉厚の減少や、より大きい膨らみが得られる。ネッキングのピッチ間は以前、単空洞を成形した時に経験的に得た値を参考にした。

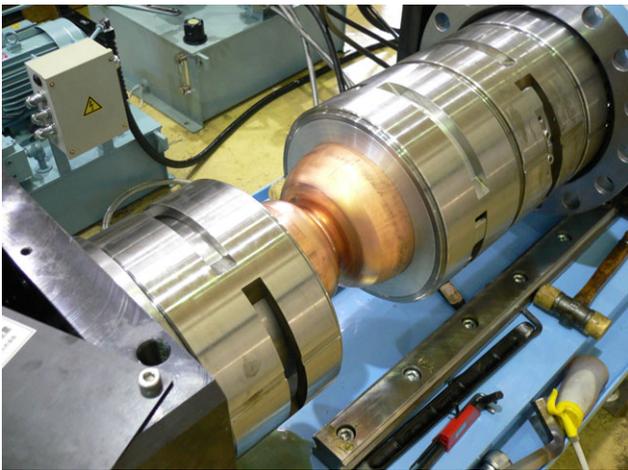


写真5 銅パイプを中間成形

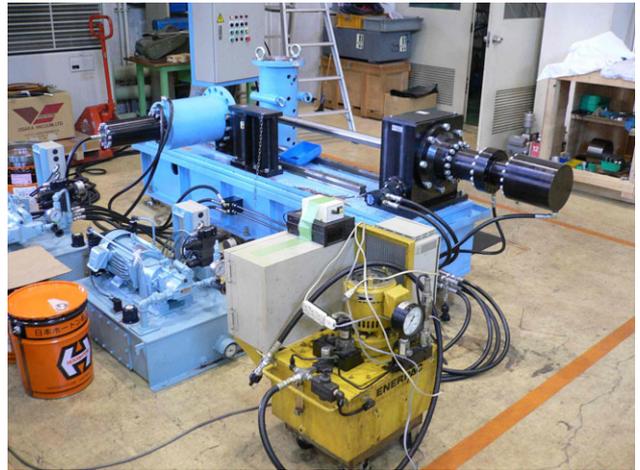


写真6 液圧成形装置（青色）と高圧ポンプ（黄色）

3、成形後の肉厚測定

最終成形を行った後、肉厚分布を調べる為に中心軸からワイヤーカットで切断した。(写真7) 図3からも分かるように赤道部の肉厚は約 2mm (33.3%減)、アイリス部は約 2mm (33.3%減)、アイリス部から立ち上がりの垂直な部分が一番薄くて約 1.3mm (56.7%減) になっている。これは内圧で膨張時、金型がアイリス部に固定され、V溝加工で肉厚が薄くなっているところに更に径方向に引張られた結果だと推測される。

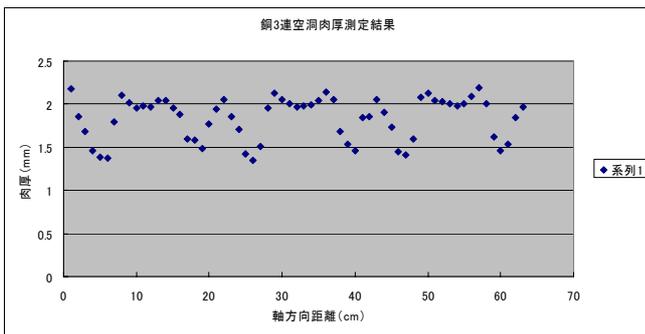


図3 肉厚分布



写真7 空洞断面

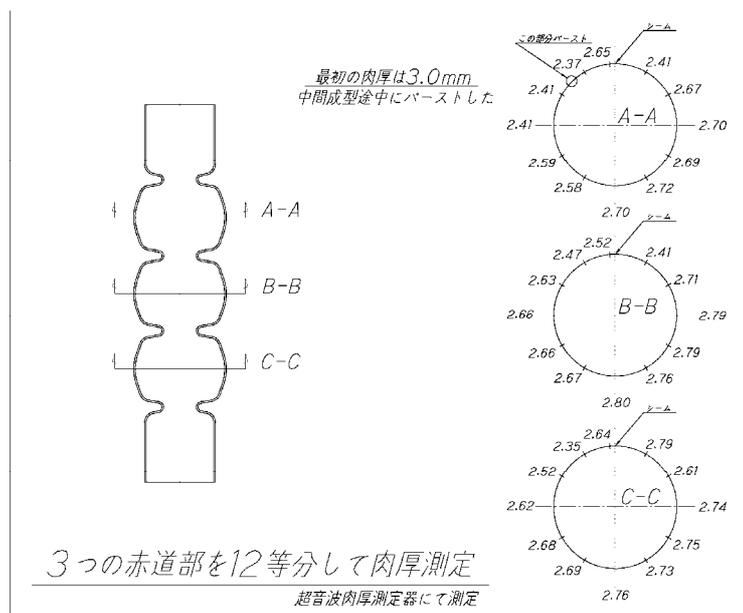


図4 Nbパイプ中間成形中にバースト (A-A)

4、材料の引張り試験

Nb パイプの中間成形途中で赤道部がバーストした。図 4 から分るようにバーストした場所が最初、予想したシーム部からではなかった。シーム部の左 45 度付近が一様に薄くなっている赤道部 (A—A) の部分が破裂した。Nb パイプの両端を切り取って、板状に伸ばして引張り試験片を製作した。(写真 8) シーム溶接部が中央に来る試験片とそうでない物、アニール処理の有無も 2 種類準備した。



写真 8 試験片の切り出し



写真 9 引張り試験機 (RTC-1325A)

Nb の試験結果

	引っ張り強さ (MPa)	伸び (%)	アニール処理	試験本数	備考
1	174.9	43.5	無し	10	
2	192.7	47.1	有り	5	
3	150.5	25.4	無し	2	シーム溶接部あり
4	164.5	24.0	有り	1	シーム溶接部あり

試験結果から言えるのはアニール処理することによって引張り強度は 10%アップする。試験片数は少ないが、中央にシーム溶接部があってもその傾向は見える。シーム溶接部があると強度は 14%ダウンする。試験片に多少、表面にキズがあるものがあつたがその差異は出てこなかった。このキズはパイプのシーム溶接後に真鍮製のプラグを圧入して真円度を良くする為に行っていて、その際に発生したキズである。この試験片からはシーム溶接部から 45 度付近の弱いと思われる部分が現れていない。試験片切り出し位置が適当でないか再度検討の余地がある。

5、まとめ

- 1、材料が銅パイプの場合は最終成形まで出来る事を確認した。
- 2、Nb パイプでは中間成形途中でバーストしたので、プレ中間金型入れて 3 段階で計画している。
- 3、板を巻いて作った Nb パイプの円周方向にシーム溶接部より弱い部分があることが分った。

参考文献

- [1] 齊藤健治 “ニオブ・銅クラッド材を用いたシームレス超伝導高周波加速空洞の開発” 文部科学省科学研究費補助金成果報告集 平成 14 年 7 月
- [2] 藤野武夫 “ニオブ・銅クラッドシームレス超伝導高周波加速空洞の研究” 博士論文 平成 15 年 5 月
- [3] 上野健治 “超伝導空洞のシームレス化に関する装置開発” 加速器学会 平成 18 年 8 月