

HEX1 熱交換器の製作

○牛谷唯人^{#A)}、川崎真介^{B)}、高富俊和^{A)}

^{A)}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

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

概要

超冷中性子という非常にエネルギーの低い中性子は1 K に冷却された超流動ヘリウムで中性子を冷却することによって生成する。HEX1 熱交換器は冷媒である液体ヘリウム3 を用いて超流動ヘリウムを冷却するための装置で、円筒型の熱交換器の外周部に冷却効率を上げるためのフィンを加工する必要がある。また、極低温でも耐える銅とステンレスの接合方法が必要となる。本報では HEX1 熱交換器の製造上の問題点と製作方法について報告する。

1. はじめに

超冷中性子は超低エネルギーの中性子で、原子核から取り出した中性子を冷却することによって生成する。冷却の最終段階では超流動ヘリウムが用いられる。超冷中性子を効率的に生成するためには超流動ヘリウムを1.0 K 程度の極低温に冷やし続ける必要がある[1]。今回の熱交換器は超冷中性子コンバーターとなる超流動ヘリウムと冷媒となる液体ヘリウム3 の間の熱交換器である。ヘリウム3 は非常に高価なので(ガス換算で30万円/litter、今回の熱交換器のフィンを満たすにはおよそ1億円分のヘリウム3が必要)、接触面積の拡大に寄与しない余分な隙間は最小限にしなければならない。そのため、上部のみのフィン構造を用いて熱交換器を作ることにした[2]。

1.1 熱交換器の構造

HEX1 熱交換器概略図(断面図)を図1に示す。熱交換器は円筒型の形状であり、中心の空洞部に超流動ヘリウム、上部のフィン部に液体ヘリウム3が入る。大きさはφ210 mm、長さ733 mmで空洞部はφ148 mmであり、重量は約100 kgである。上部フィンは97×15 mm、厚さ1 mmの板が1 mmの隙間を開けて291枚並ぶ構造である。本体部は無酸素銅製で内部表面にはニッケルリンメッキを施している。

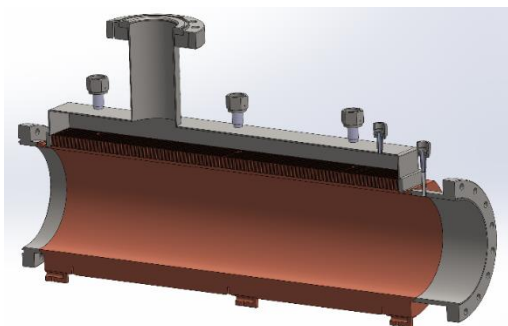


図1. HEX1 熱交換器概略図

1.2 製作上の問題点

(1) フィン加工

フィンの凹部は幅1 mm、深さ15 mmであり、幅に対して溝が深いため、加工方法の検討が必要であった。検討の結果、今回は高エネルギー加速器研究機構

(以下 KEK) 機械工学センターのワイヤーカット放電加工機(以下 WEDM)を用いることで予算の節約と納期短縮を図った。また、専用ジグを製作する事で安定した加工と容易な運搬を可能にした。

(2) 異種金属接合

フィンがある本体部は無酸素銅(以下 OFC)製でフィンを密閉するジャケットと空洞を接合するフランジ部はステンレス(以下 SUS)製であり、OFC-SUSの異種金属接合は電子ビーム溶接(以下 EBW)で行う必要がある。極低温でもリーク無く安定したEBWを行える設計を行う必要があるため株式会社東成イービーとの打ち合わせを通じて、EBWに適した熱交換器のジャケットとフランジの溶接形状を検討し、溶接試験を行って形状を決定する事とした。

2. WEDMによるフィン部の加工検討

フィン部の加工を機械工学センターの所有するWEDM(FANUC α-1iD)で行えるか検証を行った。OFCの試験用材料を用意して厚さ方向が100 mmになるようにイケールを用いて固定し、実際のフィン加工を想定して、ワイヤー上下に55 mmの間隔があるセッティングを行った。

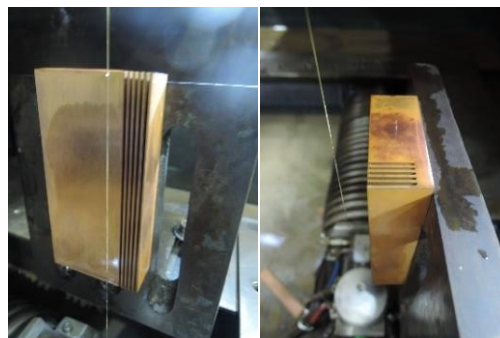


図2. フィン部試し加工

プログラムはコの字を複数回繰り返す単純なものから試し加工条件も調整した。結果、安定して加工が行え、かつ想定よりも加工速度が速く加工が行えた。しかしワイヤーが材料から抜ける際に断線し、端材が邪魔して自動結線が行えなかった。いくつかの方法を試した結果、材料から抜ける0.5 mm手前で加工を止め、ワイヤーを切断後、材料の外側で再結線し外側から残りの0.5 mmを切断するプログラムを組んだ。ワイヤーは断線することなく、端材を水圧で遠くに

弾いて加工を続けることができ、図2に示すように連続で断線無くフィン溝の加工を行えた。

3. 電子ビーム溶接に適した設計の検討

3.1 フランジ部の設計

EBW部の構造を図3に示す。図3右側はフランジ部のEBW箇所厚さは6.41mmであり、ビームの出力が大きいと空洞内面に影響が出てしまう。OFCが内側に入って組み立てる構造にし、EBWの溶け込み深さを3mm程度に調整してもらって溶け込み過ぎてしまっても空洞内面に影響が出にくい設計にした。検証のため、同じ形状の溶接試験体を3セット提供して断面観察を行った。断面観察結果、想定通り溶接を行えた事から設計に問題ない事がわかった。

3.2 ジャケット部の設計

ジャケットのEBW箇所は603×118mmと長尺でありながら厚さ2mmの箱状となっているため、製作の過程で大きな歪みの発生が考えられる。大きな歪みがあるとEBWの際にOFC-SUSの溶ける配合が一定でなくなるため、溶接クラックの発生など溶接不良の原因となる。そのためジャケットのEBW箇所は歪みが小さく肉厚一定で製作できるような設計を行った。図3左側はジャケット部のEBW構造で鋸状の部品は厚さ20mmと強度を持たせつつ、SUS-SUS溶接箇所から遠ざけることで熱影響が小さくなる構造にした。箱状の部品と鋸状の部品のSUS-SUS溶接にはファイナレーザー溶接を用いることで更なる熱影響の低下を図った。ジャケット部のOFC-SUSのEBWは、最薄箇所は厚さ3.91mmであり、溶け込み深さを2-3mm程度に抑えつつも密封性を確保する必要がある。検証のため、ジャケット部用の溶接試験体の製作を行った。溶接試験体の溶接部の寸法は118×75mmで、ショートモデルのジャケット部と同じ大きさである。溶接試験体を3セット製作し、リークチェックが可能な専用フランジも製作した。試験体のEBWはリークがなく溶接が行え、断面観察の結果、溶け込み深さは2.08-2.10mmであることが確認できた。

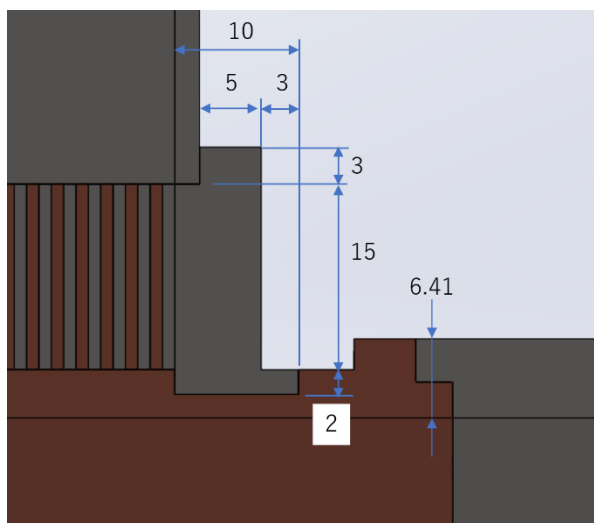


図3. EBW構造(左：ジャケット部、右：フランジ部)

4. ショートモデルとジグの設計、製作

4.1 ショートモデルの製作

全体の構造設計が固まったので、製作方法の確認や、性能試験を兼ねて先行してOFC本体部の長さを630mmから100mmに短縮したショートモデルの製作を行うことにした。

4.2 ジグの設計、製作

SUSフランジとOFC本体部のEBW後には、フィン部の加工を行う。フィン部の加工はマシニングセンターによる1次加工とWEDMによる2次加工が行われるため、安定した1次および2次加工を実現するために、ジグの設計と製作を行った。ジグと熱交換器の3Dモデルを図4に示す。既製品のSUSのチャンネル材をベースに使用する事でコストを抑えつつ、熱交換器を支えるVブロックの溶接やリークチェックが可能な専用フランジと固定用アングルを製作した。ジグはショートモデルと組み合わせることも可能であり、WEDMによる2次加工は図4の状態から熱交換器を90度回転させて組み合わせることで行うことができる。ジグを含めた重量が約120kgあるため、移動や加工機のセッティングを行う際にはクレーンを使用するために、ジグの4隅にアイナットを配置し、効果的な移動とセッティングを可能にした。

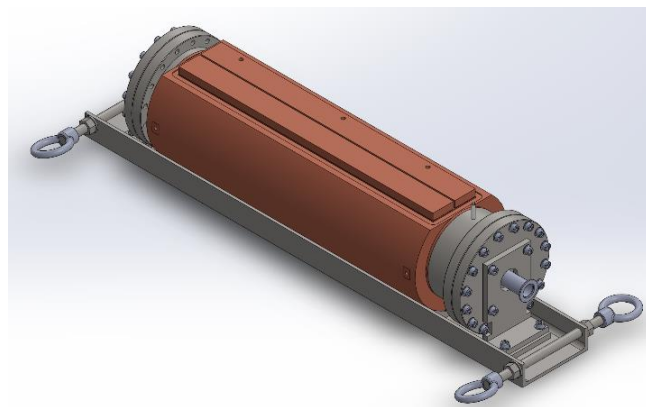


図4. ジグと熱交換器の3Dモデル

5. フィン部2次加工

フィン部2次加工は機械工学センターのWEDMを用いて行う。ショートモデルの加工はジグを用いて段取りを行い、軸方向±10μm、垂直方向±20μmの精度でセッティングを行えた。加工プログラムは加工検討時に使用したものと同じものを用い、18時間37分で加工を完了した。フィンは27山あるためフィン1山辺りの加工時間は43分であり、これは加工検討時とほとんど同じ時間である。

実モデルはショートモデルより軸方向に約500mm以上長いのでセッティングの際に両端で0.8mm高さ方向の変位があった。ジグ接地面の低い側に厚さ0.5mmの板と養生テープ2枚を挟むことにより高さ方向の変位量を0.01mmに抑える事が出来た。ショートモデルと同様のセッティングを行うことで、軸方

向±2 μm、垂直方向±5 μmの精度でセッティングを行えた。加工条件は同じであったが、端材の引っかかりやフィルター交換が大きなタイムロスとなった。加工時間は204時間34分であったが、実時間は約1.5倍の時間がかかった。フィンには290山ある事から1山辺り43分となり、加工速度に変化はなかった。WEDM加工後にエスクリンAL-17を用いて洗浄、S-800FRでスラッジ除去、S-710FRで化学研磨する事で加工面の洗浄を行った(図5)。次工程のジャケット部のEBWは溶接試験と同様に完了し、溶接箇所のリーク試験に問題ない事が確認できた。



図5. 化学研磨後のフィン部

6. 各種真空ポートの溶接と試験

各種真空ポートはEBW軌道上の障害になることからEBW後に溶接する事になっている。各種真空ポートの溶接とリーク試験、ヒートサイクル試験を行った。

6.1 真空ポート溶接

ショートモデル、実モデル共に以下に示す各種真空ポートのTIG溶接を行った。

- VCR1/4インチ継手 4個
- VCR1/2インチ継手 5個
- ICF114フランジ 1個
- Uタイトシール回転フランジ 1個

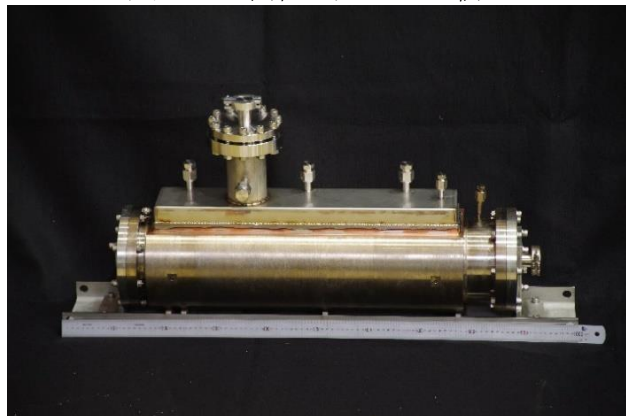


図6. 熱交換器の完成写真

EBW箇所が熱影響を与えないようにする必要があるので、溶接条件は必要最低限の電流値50Aとした。また、熱を分散させるために5mm程度溶接したら反対側の真空ポートの溶接を行い、各真空ポートに溶接を行ったら常温に冷まして再開するという手順で溶接を行った。完成した熱交換器の写真を図6に示す。

6.2 リーク試験

各種真空ポートの溶接完了後にジャケット部のリーク試験を行った。測定にはリークディテクタ(HELEN M-222LD)を用いて真空吹付け法によるヘリウムリーク試験を行い、リークは見られなかった。吹付け時のバックグラウンドリークレートは下記のとおりである。

- ショートモデル $7.3 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$
- 実モデル $1.0 \times 10^{-12} \text{ Pa m}^3/\text{s}$

吹付け前後でリークレートの変化はなく、リークが無い事が確認されたが、特に実モデルのリークレートはリークディテクタの測定下限値となった。

6.3 ヒートサイクル試験

ヒートサイクル試験は熱交換器全体を液体窒素に沈めて15分経過したら取り出して常温に戻すという作業を3回繰り返し、その間リークレートに変化が無いか観察する試験である。試験中は問題になるリークレートの変化は見られなかった。最後に熱交換器空洞部のリーク試験を行い、 $7.8 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ でリークは無かった。

7. まとめ

機械工学センターのWEDMを用いた加工検証を行い、最終的に熱交換器のショートモデル及び実モデルのフィン加工を行うことで予算の節約と納期短縮に貢献した。ジャケット部とフランジ部のOFC-SUSの異種金属の溶接は検討を重ね、EBWに適した設計と溶接試験体を提供する事で良好な溶接を行うことができた。

熱交換器専用の木箱を製作し、2023年11月にTRIUMFへ輸出した。TRIUMFではまずショートモデルをヘリウム3冷凍機内に設置し、冷却試験を実施してデータの詳細解析を行っているところである。2024年夏にヘリウム3を用いた運転を行い、その後に実モデルをインストールする。実モデルインストール後にはその他の設備と統合し、超冷中性子生成試験を行う予定である。

参考文献

- [1] Y Masuda, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108 134801 (2012).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.134801>
- [2] S. Kawasaki and T. Okamura, Conference Series Materials Science and Engineering 755, 012140 (2020).