

水素炉の運転

工藤 昇

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

1 はじめに

水素炉は加速管製作にあたって良い特徴は、加速管は大部分が銅を使用している。銅は高温の水素によって還元され表面に酸化膜がない状態になることと、Xバンド加速管ではロウ材として金ロウ（約 900℃以上）を使用しているため、SUS にも酸化膜ができずメッキなどの処理をせずに銅とのロウ付けが簡単である。金ロウの問題点は 1000℃前後高温でのロウ付けなので、銀ロウ（800℃以下）のロウ付けに比べて SUS が軟化することがあげられる。（現在 KEK では銀ロウでのロウ付けは、炉を汚す可能性があるので行っていない。ロウ材の種類によって炉の使い分けをしているメーカーもある。）

本報告では KEK の水素炉の紹介・特徴、運転方法及び一部の製作製品を報告する。

2 炉紹介・特徴

KEK の水素炉は、米のヘザリントン社と国内のタイホー（株）で製作した物で 1990 年に加速器部門で購入し 2000 年に D5 電源棟に移設して稼働している。

炉の最高温度は 1200℃、使用空間は直径 305mm で高さが 610mm まで可能、水素は一般仕様（純度 99.99%）のガスを使用している。

水素炉は多くの種類がありますが、一般的な型はレトルト炉という型で、耐熱用の SUS のベルジュア内にワークを収納し外側からヒーターで加熱する炉である。KEK の炉はタンク内にヒーターが入っていて、その内側にワークをセットする簡易型炉である。（写真 1, 図 1）

レトルト炉と比較して良い点は、タンクとヒーターは同時に油圧で上下するのでクレーンが必要なく、設置スペース（約 2.5m x 2.5m）がわずかで済むことである。また間違えてタンク内で水素が爆発を起こしても、爆発の瞬間にタンクが持ち上がるが油圧で元に復帰するので、高い天井が必要でない点である。不便な点は、クレーン作業が出来ないので重量物のセットを人力等で行なうしかなく大変である。

この水素炉の適正な運転の為には以下のユーティリティが必要である。

電源	: 200V x 3 相 x 300A	冷却水	: 65 l/min 以上 (圧力: 2.5~10.0 kg/cm ²)
圧縮空気	: 5.0 kg/cm ² 以上	水素	: 2.5~3.5 kg/cm ²
窒素	: 2.5~4.0 kg/cm ²	プロパン	: 1000~2000 mmAq

据付最小必要寸法: 幅 2200 x 奥行き 1800 x 高さ 3700 mm

KEK で使用しているロウ材は、銅ロウ (1083℃)、Au75-Cu25 (1030℃)、Au65-Cu35 (1010℃)、Au50-Cu50 (970℃) の 4 種類である。（WESGO 社製）ロウ材のセットはまだ経験が浅く多くの問題点があるが、もっとも大変なことは炉床へのワークのセットがあげられる。

大きいワークの場合、ワークが転倒するとヒーターに損傷を与える可能性があり、その対策が一番の問題である。

（ヒーターはモリブデンである、モリブデンは堅くもろいので衝撃で損傷する可能性がある。）



写真 1. 水素炉外観 (B2500S)

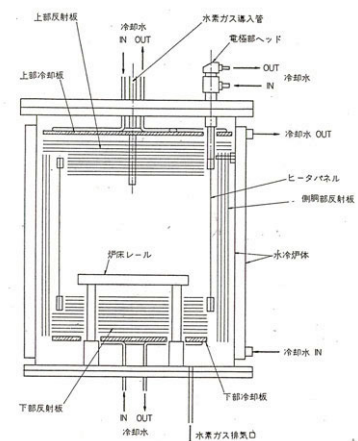


図 1. 炉の概念図

3 炉の運転

運転方法は 1990 年の購入時に水素炉の選定委員会が設置され、素人でも安全に運転できる機種ということで購入したので誰でも運転可能である。

全てのユーティリティが整うと、パネルの AUTO のランプが点滅し、これが起動条件は完了のランプである。

運転は自動（オートサイクル）運転で行う。（図 2 参照）

運転の流れを説明する。

AUTO ボタンを押すと運転開始でパイロットバーナー（プロパン）が点火する。

VAC ON（真空排気）

点火確認後、ロータリーポンプが稼働し、電磁弁が開きタンク真空引きを 100mmTorr まで排気。（スタートからの時間は 3 分 40 秒前後）

H₂ BACK FILL（水素ガス導入）

真空引きラインの電磁弁を閉め、水素ガスの流量計を通さないラインの電磁弁が開き水素ガスをタンクへ 100mmAq まで導入。（導入終了まではスタートから 8 分 30 秒前後）

H₂ FLOW—POWER ON—POWER OFF（ロウ付け、加熱・冷却）

圧力スイッチが作動し水素ガスの流れは流量計側に変わり、ヒーターの電源が入り、プログラム調節計が作動する。（加熱速度と待機時間はワークの重量、形状を考慮して、デジタルプログラム調節計にあらかじめセットしておく。）

加熱速度は 8～13℃/min で行い、最終温度はロウ材の（融点+35～45）℃とし、待機時間（熱電対でロウ材の融点+10℃以上になったことを確認）は最終温度で 10～30 分間行う。冷却はロウ材の（固相温度-20）℃くらいまで -10℃/min でゆっくり行い、その後最大速度（-999.9℃/min）で下降しヒーター電源を切る。

POWER ON から OFF までは 2～5 時間で、その後も水素は流量計を通してワークを冷却する。

N₂ PURGE（ガス置換）

記録計でヒーター温度が 45℃になると、水素ガスフローが窒素ガスパージに変わる。窒素ガスのパージはワークを取り出すための置換作業で 20 分間行なう。

UP ランプ点灯 終了警報

これで水素炉の運転は終了。

運転時間はワークの重量で異なるが、4～10 時間の 1 日作業で終了する。但しイベントはすべてヒーター温度で行われているので、重量物の場合は温度が下がりきる前に置換作業に入ることがある。適温でワークを取出すため重量物の場合、ヒーター温度が 70℃前後で自動運転を手動運転に切替える。切替え後（手動）パイロットを点火、水素ガスを流量計経由で流しワークが 50℃以下になってから窒素ガスに切替える。

これは、水素ガスのほうが窒素ガスより冷却能力があるからである。

4 製作した製品

製品の紹介の前に銅材は一般には無酸素銅、燐脱酸銅（主に丸棒）、タフピッチ銅（主に板材）3 種類の材料が市販されている。水素炉での加熱で前者 2 つはあまり問題がないが、タフピッチ銅（酸素 0.02～0.05%）は水素脆化を起こし異種金属とのロウ付けにも問題が生じる。（写真 2）



写真 2. 熱処理前



熱処理後上 2 枚がタフピッチ

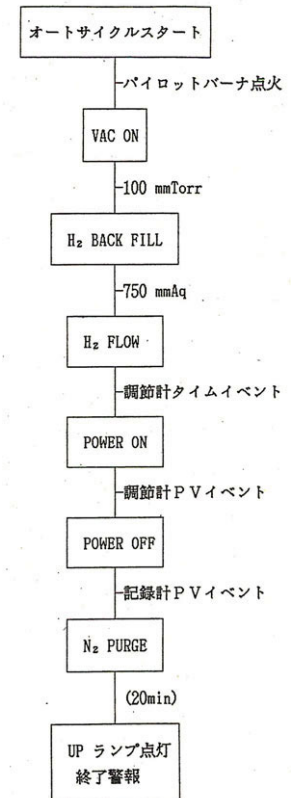


図 2. 運転の流れ

製作した主な製品（図面は設計者の理解が必要ですので、今回は写真と水素炉の運転回数、使用ロウ材の記述とする。）

加速管

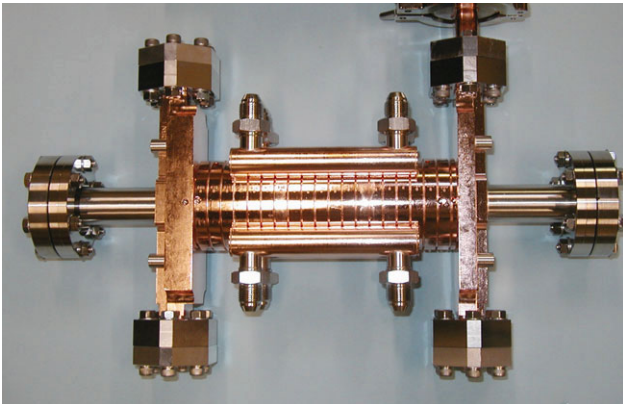


写真3. T20VG5 20 c m加速管（2002）

T20VG5（写真3）

部品点数 64

（カプラー部品 8x2セット、水冷管 5x4セット
セル 20枚、チューニングピン 8本）

炉の運転回数 6回（拡散接合含む）

使用ロウ材 2種類

Au25-Cu75 ワイヤー、シート

Au35-Cu65 ワイヤー、シート

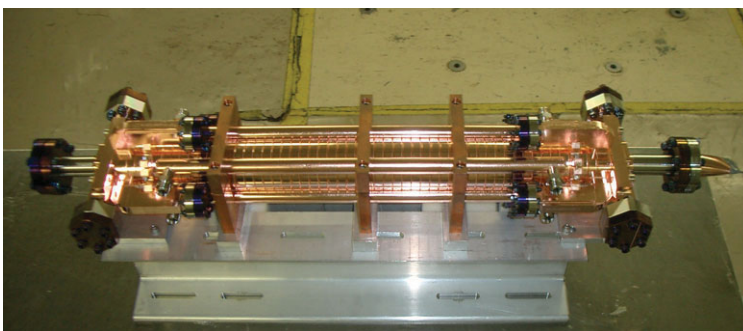


写真4 KX-03 60cm 加速管（2005）

KX-03（写真4）

部品点数 219

（カプラー部品 8x2、水冷管 5x4、
セル 53枚、チューニングピン 106本、
HOM 3x8）

部品（写真5～8）の製作はKEKの水素炉
で行い、セルの拡散接合及び最終ロウ付け
は東芝電子管デバイス（株）で行った。

東芝での使用ロウ材 Au37-Cu63 ワイヤー

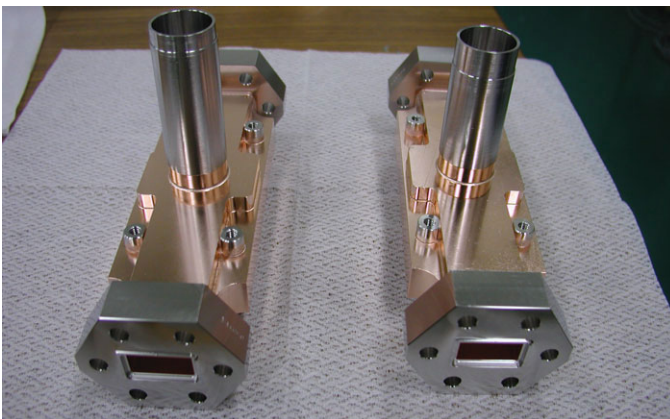


写真5 KX-03 カプラー

カプラー（写真5）

炉の運転回数 2回

使用ロウ材 1種類

Au25-Cu75 シート

水冷管（写真6）

2回

1種類

Au25-Cu75 ワイヤー



写真6 KX-03 水冷管



写真7. KX-03 異形セル（IN, OUT）

異形セル（写真7）炉の運転回数 1回 使用ロウ材 1種類

HOM（写真8）炉の運転回数 2回 使用ロウ材 1種類



写真8. KX-03 HOM

Au25-Cu75 シート

Au25-Cu75 ワイヤー

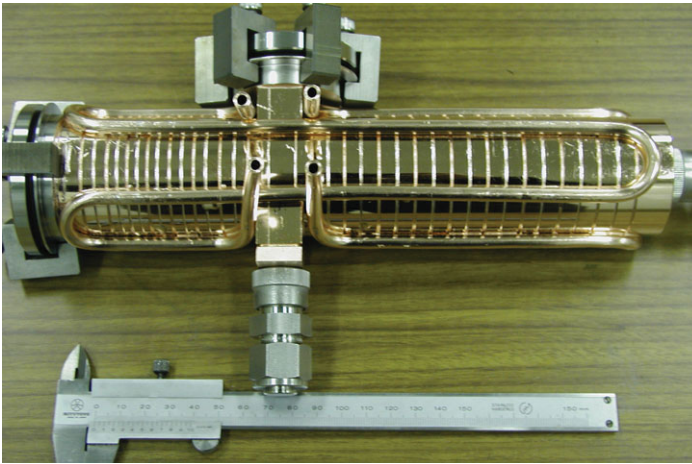


写真9. 9.4GHz 1MV/m 加速管 (2006)

9.4GHz 1MV/m 加速管 (写真9)

部品点数 41

(カプラー部品 2、水冷管 2

セル 29枚、他 8)

炉の運転回数 6回

使用ロウ材 2種類

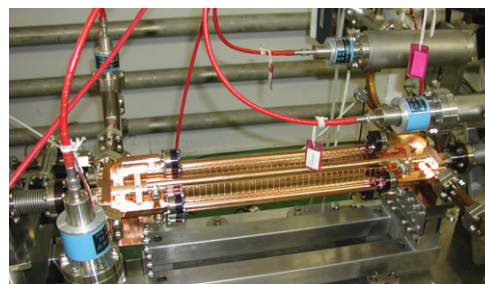
Au25-Cu75 ワイヤー、シート

Au35-Cu65 ワイヤー、シート

(単品でのロウ付けは Au25-Cu75 を使用し、
組立て時は Au35-Cu65 を使用)



9.4GHz 1MV/m 加速管テストスタンドに設置



KX-03 XTF に設置パワー試験



写真11. RF GUN

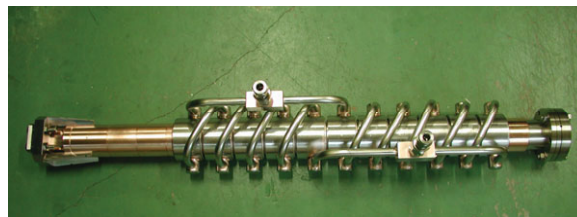


写真10. Xバンドダミーロード

Xバンドダミーロード (写真10)

部品点数 76

炉の運転回数 5回

使用ロウ材 4種類

銅ロウ ワイヤー、シート

Au25-Cu75 ワイヤー、シート

Au35-Cu65 ワイヤー

Au50-Cu50 ワイヤー

Sバンド RF GUN (写真11)

部品点数 40

炉の運転回数 6回

使用ロウ材 3種類

Au25-Cu75 ワイヤー

Au35-Cu65 ワイヤー

Au50-Cu50 ワイヤー、シート

おわりに

水素炉を運転開始して約9年大きなトラブルもなく500回以上作業できたことは、設置時に多くのことを想定して購入された方々に感謝いたします。

SLAC 及び民間会社等の技術を吸収できる範囲で応用していますが、まだ自己流の域は超えてはいないと思われまます。真空炉を含めたロウ付け経験者のかたの助言を頂ければ幸いです。