

平成 21 年度シーズ発掘試験（発掘型）研究報告書

報告日：平成 22 年 4 月 23 日

課題名：ヘリウムガスによる自然循環流のパッシブ制御法の開発

研究期間：平成 21 年 7 月 16 日～平成 22 年 3 月 31 日

1. 担当コーディネータ

氏名（役職）	還田 隆（准教授，地域連携室長）	
所属機関名	国立大学法人山梨大学 産学官連携・研究推進部 地域連携室	
連絡先	所在地	〒400-8510 山梨県甲府市武田四丁目4番37号
	TEL/FAX	
	E-mail	tkanda@yamanashi.ac.jp

2. 代表研究者（代表研究者のみ記入してください。）

氏名（役職）	武田 哲明（教授）	
所属機関名	国立大学法人山梨大学 大学院医学工学総合研究部	
連絡先	所在地	〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3番11号
	TEL/FAX	
	E-mail	ttakeda@yamanashi.ac.jp

3. 共同研究者（JST と委託研究契約を締結した共同研究機関の場合のみ記入してください。）

氏名（役職）		
所属機関名		
連絡先	所在地	
	TEL/FAX	
	E-mail	

4. 試験研究の結果報告

(1) 試験内容

本試験では、従来の能動的システムの問題点を解決して画期的な受動的自然循環流制御技術を実現するために、作動流体を空気とし密度の小さい特定気体にヘリウムガスを用いて、逆U字型円管により実験を行い、自然循環流の流動・制御特性を調べることが主な目的である。具体的には、①逆U字管流路の一方を加熱し、加熱量、ヘリウムガスの注入量、注入位置等をパラメータとして自然循環流の流動・制御特性を調べること、②円管外から圧力差により自動注入可能な制御用気体容器を試作して、圧力差による受動的な気体注入方法を調べることが試験項目であった。

そこで、逆U字管の片方を電気ヒータにより加熱、他方を断熱または冷却可能な試験部を製作した。実験では、熱電対により、壁温度、ガス温度を測定し、熱線風速計センサーにより流速の測定を行った。また、当初は酸素濃度計により混合気体中の酸素濃度を測定し、気体密度を求める予定であった。しかしながら、酸素が含まれない気体の場合には気体密度が測定できないことから、超音波音速計により混合気体の音速を測定することで二成分気体の密度が算出できる方法を採用した。この超音波音速計を用いることで、より多くの気体の組み合わせに対しても実験が可能となることから、酸素濃度計による酸素濃度測定は中止した。

さらに、当初は小さな穴を開けた充てん容器を円管内に設置する予定であったが、本試験ではヘリウムガスの連続的及び間欠的注入、並びに一定量注入により、自然循環流が発生しないということが分かれば、原理的には圧力差によるヘリウムガスの受動的注入方法の検討ができることから充てん容器の試作を中止し、解析による気体密度比の検討を行った。

(2) 得られた成果

ヒータ及び熱電対取り付け前の実験装置の写真を図1に示す。本装置は逆U字管の両端を、円筒形の充填容器に遮断弁（ボール弁）を介して接続したものである。逆U字管流路は内径約17mm、高さ約1000mmの2本の円管を内径約17mm長さ約300mmの直管をスウェージロックにより接続して構成した。鉛直円管の一方に100V80Wのテープヒータを巻き付けた。もう一方の鉛直円管には冷却ジャケットを管の外側に設けて水冷した。熱電対により、加熱、冷却管壁温度、円管内気体温度等を測定した。逆U字管内各部の混合気体をポンプによって超音波式ガスモジュールに連続的に吸引し（図2）、2成分混合気体の成分気体モル分率を測定した。この超音波式ガスモジュールは混合気体の音速を求め、2成分混合気体が理想気体の状態方程式に従うと仮定して成分気体モル分率を求めている。さらに、この成分気体モル分率から混合気体密度を求めた。測定気体を吸引することによって、逆U字管内の流れを乱さないように吸引流量はできる限り少なくすると共に、測定を終えたガスは吸引孔付近に戻した。浸入流速を測定するために、加熱管側の端部に風速計を設けた。

実験は以下の手順で行った。まず遮断弁を閉じて、管内にヘリウムガスを充填し、円管を加熱して壁温度を所定の温度に保持した。加熱管の壁温及び管内気体温度が定常状態に達した後、2つの遮断弁を同時に開いて実験を開始した。実験中は加熱管壁温度を時間的に一定値に保持するとともに、管内を一巡する空気の自然循環流が発生し、流速が定常状態に達するまで実験を継続した。

図3に加熱管入口流速の時間変化を示す。遮断弁開放直後、それまで両流路間の密度差により発生していた浮力に等しいだけの高さまで高温側流路内に空気が浸入するため流速が一旦上昇するが、直ちに浮力が小さくなって流速は減少し、ゼロに漸近する。この状態が暫く継続し、突然空気の自然循環流が発生した。流速が0 m/s から約0.16 m/s に達するのに要した時間はわずか数秒であり、自然循環流が発生するまでに60分以上要したことを考えれば、現象は急激であるといえる。



図1 ループ流路



図2 超音波式ガスモジュール

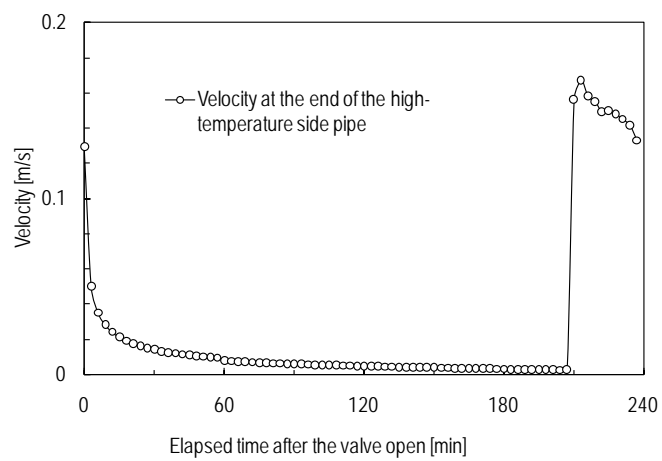


図3 断面内平均流速の時間変化

簡単な数値解析を実施したが、遮断弁開放後の初期段階における流速の計算値は約 10^{-5} m/s のオーダーであり、空気自然循環流速の計算値は 0.14 m/s であった。そこで、逆U字管高さ(L)を代表長さとして、ペクレ数 $Pe = (u^* L) / D_{AB}$ を求めると、遮断弁開放から空気自然循環流が発生するまでは $0.1 < Pe < 3$ の範囲であり、運動方程式中における対流項と拡散項による空気の移動量はほぼ同程度であると考えることができる。また、数値解析結果から、逆U字管の鉛直部分についてそれぞれ密度の積分平均値を求め、両流路の $\bar{\rho}gh$ を計算して密度差に伴う浮力 ($\Delta\rho gh = (\bar{\rho}_c - \bar{\rho}_h)gh$) を計算した。この浮力と両流路の密度積分値の時間変化を図4に示すが、逆U字管の両側から空気が浸入することによって浮力が打ち消されるため、空気自然循環流が発生しないことが分かる。自然循環流の発生直前では、低温側流路の密度積分値が大きくなって浮力が増大していることから、低温側流路の密度積分値が高温側流路の密度積分値の最大値よりも大きくなって自然循環流の発生に至っている。

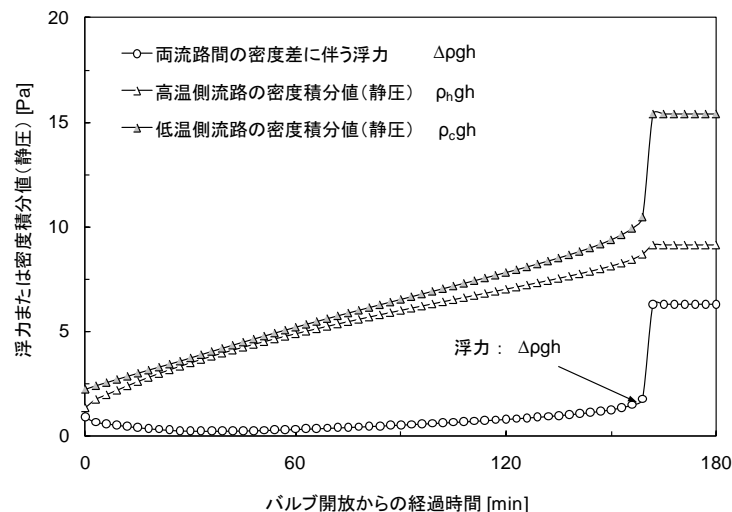


図4 浮力と両流路の密度積分値の時間変化

以上のことから、逆U字型流路内への空気浸入挙動のメカニズムについて考察した。破断直後は両流路にヘリウムガスが充填され、一方が高温、もう一方が低温であり、逆U字管の下部には常温でヘリウムガスの約7倍も密度の大きい空気が存在している。この状態では空気が逆U字管内を一巡するような自然循環流を発生させるだけの浮力は発生せず、分子拡散と極めて流速の遅い混合気体の自然循環流により空気が浸入する。時間の経過とともに両流路の混合気体密度が大きくなるが、前述のように密度差に伴う浮力は大きくなる。また、高温側流路における混合気体密度は、たとえ流路内がすべて空気に置換されても高温による密度低下のため、その温度に対する空気の密度よりも大きくなることはない。したがって、低温側の混合気体密度の積分値が高温側の密度積分値の最大値よりも大きくなると、浮力が大きくなって自然循環流が発生する。

遮断弁開放から空気自然循環流が発生するまでの分子拡散と極めて流速の遅い混合気体の自然循環流により、気体が浸入する過程を第1段階、空気自然循環流が発生して多量の窒素が浸入する過程を第2段階と呼ぶこととする。

これまで行った実験と解析について、空気自然循環流発生時間を逆U字管流路内の温度差による密度差と管内と管外気体の種類による密度差の比 R_p により整理したものが図5である。この場合、密度差の比は、成分気体を理想気体であると仮定すると、

$$R_\rho = \frac{\Delta\rho_T}{\Delta\rho_C} = \frac{\rho_c - \rho_h}{\rho_0 - \rho_c} = M_{He} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h} \right) \left/ \left(\frac{M_{Air}}{T_0} - \frac{M_{He}}{T_c} \right) \right. \quad (1)$$

ここで、高温側流路平均温度 T_h 、低温側 T_c 、管外温度 T_0 とし、本実験では $T_c = T_0$ と仮定しているため、式(1)は

$$R_\rho = \left(\frac{T_h - T_0}{T_h} \right) \left/ \left(\frac{M_{Air} - M_{He}}{M_{He}} \right) \right. = \left(\beta_T \Delta T \frac{T_0}{T_h} \right) \left/ \left(\beta_C \frac{M_{Air}}{M_{He}} \right) \right. \quad (2)$$

となる。ここで、

$$\beta_T = \frac{1}{T_0}, \beta_C = 1 - \frac{M_{He}}{M_{Air}} \quad (3)$$

である。

管外気体が混合気体のときは、

$$\rho_0 = \frac{pM_{Air}}{RT_0} X_{N_2} + \frac{pM_{He}}{RT_0} (1 - X_{Air}) \quad (4)$$

であるから、式(2)は

$$R_\rho = \left(\beta_T \Delta T \frac{T_0}{T_h} \right) \left/ \left(\beta_C X_{Air} \frac{M_{Air}}{M_{He}} \right) \right. \quad (5)$$

とできる。図から考察すると、第1段階の持続時間は一般に式(5)の R_ρ ですべての場合を一つの曲線で整理することができないが、 R_ρ の分母である $\Delta\rho_C$ を一定に保持しながら $\Delta\rho_T$ を変化させる場合は、第1段階の持続時間をある程度予測することができる。図中の○はヘリウム-空気、△はヘリウム-ヘリウム・空気混合気体、□は窒素-アルゴンの場合であるが、ヘリウム-空気系に限っても、一方の気体が混合気体のときは、 $\Delta\rho_C$ が異なるため、同じ R_ρ の値に対しても第1段階の持続時間が異なる。以上のことから密度比を用いて自然循環流の発生時刻、すなわち第1段階の持続時間を予測することが出来る可能性があり、自然循環流の制御パラメータの一つとして検討する価値があるといえる。

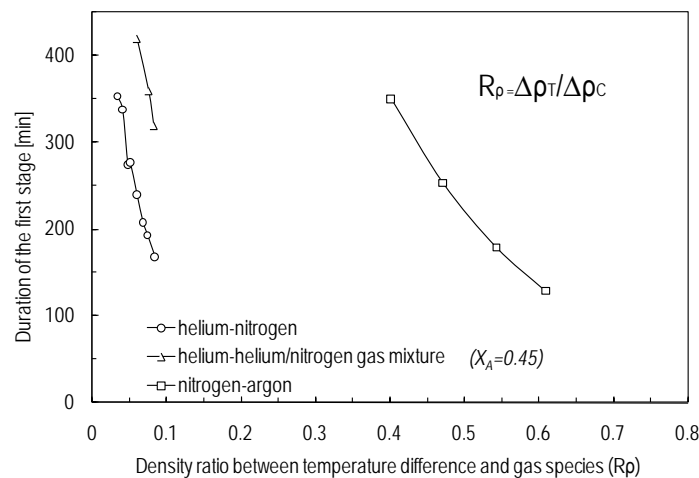


図5 温度差による密度差と気体の種類による密度差の比と自然循環流発生時間との関係

以上の結果から、ヘリウムガスによる自然循環流の流動・制御特性を調べることができ、パッシ

ブ制御法の開発に必要な基礎データの取得など当初の目的は達成した。完全なパッシブ方式となりうる容器を試作しなかったが、実用化の観点からは外部注入法による能動的方式による自然循環流の制御は、気体の密度差が大きい場合は明らかに自然循環流が発生しないことから、本実験で実証されたと考えて良い。本実験結果により、完全パッシブ方式による空気浸入防止装置あるいは自然循環流制御装置の実用化については、装置内部に受動的気体放出機構あるいは容器を試作し、受動的注入方法のみ実証すれば、実用化に向けての自然循環流制御実証試験は不要である。さらに、今後、本実験装置を用いて気体の密度比を変化させた場合の実験を行うことにより、詳細な自然循環流制御特性の知見が得られるものと考えられる。

(3) 今後の展開

本実験研究により密度の異なる気体による自然循環流の流動・制御特性を調べることができ、当初の目的は達成した。この成果については知的財産権を十分考慮した上で、機械学会において口頭発表の予定である。実用化の観点からは外部注入法による自然循環流の制御は、密度差が大きい場合は明らかに自然循環流が発生していないことから、本実験で実証されたと考えて良い。本実験結果により、完全パッシブ方式による空気浸入防止装置あるいは自然循環流制御装置の実用化については、装置内部に受動的気体放出機構あるいは容器を試作し、受動的注入方法のみ実証すれば、実用化に向けての自然循環流制御実証試験は不要である。さらに、今後、本実験装置を用いて気体の密度比を変化させた場合の実験を行うことにより、詳細な自然循環流制御特性の知見が得られるものと考えられる。

今後は本実験装置を用いて更に研究データを蓄積していきたい。また、完全パッシブ方式による大規模試験装置へ適用するために必要な受動的気体放出機構については、日本原子力研究開発機構との共同研究により原子炉への適用を検討していきたい。さらに小型の産業装置への適用は小さな受動的気体放出機構を考案することで対応していきたい。

(4) 知的財産権について

本実験によるデータと更なる実験データを用いて実用化システムに関する知的財産権を確保していく計画である。但し、基礎的な考え方に新規性は見られることから、進歩性を確保できる程度のデータ積み上げが認められた段階で迅速に出願検討を知財部門と実施する。

(5) 今後のフォローアップ等について（コーディネータ記載）

本技術は、自然エネルギーを最大限利用する考え方であることから、これからの人類にとって最適な方向性を呈すると考えられる。従って、以下のプロセスを踏むことにより、より広範な利用側面を構築していきたい。このためには、企業の支援も必須であり、また資金の獲得のため競争資金応募へ意欲的に向かいたい。

今後1年程度を目途に、上述の追加データ取得については可能な限り迅速に行い、知財確保と学会発表を遂行することから、関心を持つ企業の探索に向かいたい。

また、3年程度を目途に、共同研究企業が応用性に確信が持てるよう、顕在化系の競争資金を得て研究速度を確保したい。さらに、長期的な活動として、汎用的な技術構築に進化させるとともに、特殊応用だけでなく身近な民間製品への応用を容易に出来るようにしていきたい。