

宇宙用冷凍機の寿命試験と搭載実績 - 地上での寿命試験 - Lifetime Test and Heritage on Orbit of Coolers for Space Use

檜崎 勝弘, 恒松 正二, 大塚 清見, 金尾 憲一(住友重機械);

村上浩, 中川貴雄, 満田和久, 佐藤亮太, 菊池健一, 杉田寛之, 佐藤洋一(宇宙航空研究開発機構); 村上正秀(筑波大)

NARASAKI Katsuhiko, TSUNEMATSU Shoji, OTSUKA Kiyomi, KANAO Kenichi (SHI); MURAKAMI Hiroshi,

NAKAGAWA Takao, MITSUDA Kazuhisa, SATO Ryota, KIKUCHI Kenichi, SUGITA Hiroyuki, SATO Yoichi (JAXA);

MURAKAMI Masahide (University of Tsukuba)

E-mail: kth_narasaki@shi.co.jp

1. はじめに

住友重機械工業(株)では1991年以来宇宙用冷凍機の開発をしてきている。ここでは、宇宙搭載実績ができた、冷却温度が80K、20K、4Kレベルの3種類の冷凍機の地上での寿命評価試験について報告する。工場での寿命試験の運転実績のまとめを温度レベルに区別してTable 1に示す。

2. 一段スターリング冷凍機

冷却温度が80Kレベルに対しては、3台の1段スターリング冷凍機が寿命評価に供されている。これらは、宇宙用に開発仕様を設定し、フラットスプリングによるクリアランスシール方式と双曲磁石の採用により高効率、長寿命を達成した。冷凍機の仕様は冷却能力1W@80Kで消費電力40W以下、重量は4.2kgである。¹⁾ これらの冷凍機は顕著な性能劣化は見られず、稼働中である。最初の1台は85248時間を達成し(表中①)、他の2台も63500時間を達成している(表中②と③)。

3. 二段スターリング冷凍機

冷却温度が20Kレベルに対しては、2台の「あかり」タイプ(表中の④と⑤)の二段スターリング冷凍機が評価され、更に1台の改良型(表中の⑥)が寿命評価を開始している。どちらの圧縮機にもリニアボールベアリングによるクリアランスシール方式を採用し高効率、長寿命を達成した。冷凍機の仕様は冷却能力0.2W@20Kで消費電力80W以下、重量は9kgである。²⁾ 改良型は更

にコールドヘッドのデイスプレーサー支持方式を改良し、低アウトガス対策を実施している⁴⁾。最初の1台(表中の④)は72906時間後に運転を停止し、劣化要因を分析した。分析結果については学会にて報告する。改良型は新しいX線観測ミッションであるASTRO-Hのために評価試験を開始した。

4. JT 冷凍機

冷却温度が4Kレベルに対しては二段スターリング冷凍機を予冷機としてジュール・トムソン(JT)冷凍機と組合せた冷凍機を高効率の観点から採用している。冷凍機の仕様は冷却能力20mW@4.5Kで消費電力120W以下、重量23Kgである。³⁾ 最初の1台(表中の⑦)は、予冷機にはGM冷凍機を採用し、JT冷凍機の1年間の評価を実施した。SMILES用の冷凍機が現在試験中である(表中⑧)。JT冷凍機も二段スターリング冷凍機と同様にASTRO-H他、次世代のプロジェクトのために改良型があり、評価試験を開始した(表中⑨)。

参考文献

1. N. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 63 (2000) p.166
2. K. Narasaki et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 63 (2000) p.165
3. K. Narasaki et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 52 (1995) p.75
4. Y. Sato et al.: Cryocooler, Vol. 15 (2008) p.13

Table 1 Summary of Operating hours (September 30, 2010)

Test Models	Temp. Level	Operating hours	Remark
Single-stage Stirling Cooler			
①Engineering Model	80K	85248	1999 November: Operation Start
②Prototype Model-1	80K	67532	2001 November: Operation Start
③Prototype Model-2	80K	63933	2002 May: Operation Start
Two-stage Stirling Cooler			
④Engineering Model	20K	72906	1999 March: Operation Start 2008 August: Operation Stop
⑤Prototype Model for SMILES (Note2)	20K	22283	2007 May: Operation Start
⑥Prototype Model for ASTRO-H (Note2)	20K	3394	2010 January: Operation Start
JT Cooler for 4 K			
⑦Engineering Model for SMILES (Note1)	4.5K	9315	1998 September: Operation Start 1999 December: Operation Stop
⑧Prototype Model for SMILES	4.5K	22283	2007 May: Operation Start
⑨Prototype Model for ASTRO-H	4.5K	3079	2010 January: Operation Start

Note1: Test was JT Cooler only. GM refrigerator was used as pre-cooler.

Note2: The cooler is used as pre-cooler for 4 K-class cooler.

宇宙用冷凍機の寿命試験と搭載実績 - 軌道実績 - Lifetime Test and Heritage on Orbit of Coolers for Space Use

榑崎 勝弘, 恒松 正二, 大塚 清見, 金尾 憲一, 岡林 明伸(住友重機械); 満田和久, 村上浩, 中川貴雄,
佐藤亮太, 菊池健一(宇宙航空研究開発機構); 村上正秀(筑波大); 小林正規(千葉工業大学)

NARASAKI Katsuhiko, TSUNEMATSU Shoji, OTSUKA Kiyomi, KANAO Kenichi, OKABAYASHI Akinobu (SHI);

MITSUDA Kazuhisa, MURAKAMI Hiroshi, NAKAGAWA Takao, SATO Ryota, KIKUCHI Kenichi (JAXA);

MURAKAMI Masahide (Univ. of Tsukuba); KOBAYASHI Masanori (Chitech)

E-mail: kth_narasaki@shi.co.jp

1. はじめに

住友重機械工業(株)では1991年以来宇宙用冷凍機の開発をしてきている。ここでは、宇宙搭載実績ができた、冷却温度が80K、20K、4Kレベルの3種類の冷凍機の軌道上での運転状況を報告する。地上試験と軌道上での運転実績のまとめを温度レベルに区別して **Table 1**に示す。打ち上げ前には適当な時点で表1の全ての冷凍機はガス交換とガス精製を実施している。

2. 一段スターリング冷凍機

冷却目標温度が80Kレベルに対しては、MUSES-Bに搭載されるLow-Noise アンプの冷却用に1987年から民生品の1段スターリング冷凍機を宇宙用に改良することを開始した。おしくもMuses-Bには搭載されなかったが、1段スターリング冷凍機はその後、宇宙仕様を開発目標に設定して開発を継続し、日米の国際協力で開発されたX線天文衛星“すざく”(ASTRO-E:2005年7月打上)、日本初の大型月探査機“かぐや”(SELENE:2007年9月打上)及び金星探査機“あかつき”(Planet-C:2010年5月打上)に検出器や断熱シールドの冷却を目的として搭載されている。¹⁾ “すざく”搭載の冷凍機は今年の7月に5年の稼働時間を達成した(表中①)。“かぐや”搭載の冷凍機は地上での観測性能確認試験にも1年以上使われた後、打上げられて軌道上でも約1.5年の観測に供されて無事役目を終えることができた(表中②)。

3. 二段スターリング冷凍機

冷却目標温度が20Kレベルに対する冷凍機は、赤外線天文衛星“あかり”(ASTRO-F)の液化ヘリウムの保持寿命を向

上させるための断熱シールドの冷却を目標に1991年から開発をスタートさせた。あかりのミッションの目的は赤外線による天文観測を行い、銀河の形成と進化の過程、星や惑星の形成過程に利用することであり、2006年2月に打上げられた。²⁾ “あかり”には2台搭載されているが、1台は液化ヘリウムが予定通り消費されたのち、コールドヘッドでの絶縁不良により、停止した(表中⑤)。残りの1台が稼働中である(表中④)。

4. JT 冷凍機

冷却目標温度が4Kレベルに対する冷凍機は国際宇宙ステーションの日本の実験モジュール“きぼう”の船外実験プラットフォームに設置された超伝導サブミリ波サウンダー“SMILES”の検出器である超伝導ミキサの冷却を目的として、1993年より開発機の設計を開始した。SMILESは成層圏大気に含まれる微量ガス成分の3次元分布を観測することを目的としている。この冷凍機は2段スターリング冷凍機を予冷機としてジュール・トムソン(JT)冷凍機と組合せたものである。³⁾ SMILESは2009年9月に打上げられ、国際宇宙ステーションに設置されて運用を開始した。2010年6月に運用を中断し、現在は再冷却の準備中である(表中⑥と⑦)。

参考文献

1. K. Narasaki, et al.: Adv. in Cryogenic Engin., Vol. 51B (2006) p. 1505-1512
2. K. Narasaki, et al.: Adv. in Cryogenic Engin., Vol. 49B (2004) p.1428-1435
3. K. Narasaki, et al.: Adv. in Cryogenic Engin., Vol. 49B (2004) p. 1785-1796

Table 1 Summary of Operating hours for Flight Coolers (September 30, 2010)

Projects	Temp. Level	Operating hours			Remark
		On Earth	On Orbit	Total	
Single-stage Stirling Cooler					
①ASTRO-E2 (Suzaku)	150K	2000	45800	47800	2005 July : Operation Start
②SELENE/GRS (Kaguya)	80K	9200	12600	21800	2007 December :Operation Start 2009 June: Mission Completed
③Planet-C/IR2 (Akatsuki)	60K	500	700	1400	2010 July: Operation Start
Two-stage Stirling Cooler					
④ASTRO-F (Akari)-A	30K	2098	40350	42448	2006 February: Operation Start
⑤ASTRO-F (Akari)-B	30K	2121	13800	15921	2006 February: Operation Start 2007 October: Operation Stop
⑥JEM/SMILES(Note1)	20K	2250	6035	8285	2009 September: Operation Start
JT Cooler for 4 K					
⑦JEM/SMILES	4.5K	1172	6010	7782	2009 September: Operation Start 2010 June: Operation Suspension

Note1: The cooler is used as pre-cooler for 4 K-class cooler.

GM 冷凍機における精密温度制御 (2) — リアルタイム測定とその解析 —

High-precision temperature control using a GM cryocooler (2)

- real-time measurement and analysis -

中村 太紀, 常見 文昭, 長谷川 靖洋, 村田 正行, 山本 浩也(埼玉大); 小峰 啓史(茨城大)
 NAKAMURA Daiki, TSUNEMI Fumiaki, HASEGAWA Yasuhiro,
 MURATA Masayuki, YAMAMOTO Hiroya (Saitama Univ.); KOMINE Takashi (Ibaraki Univ.)
 E-mail: nakamura@energy.env.gse.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

GM 冷凍機において、4.2 K 付近の温度領域ではディスプレイにおける約 1 秒周期のピストン運動が原因で±100 mK 程度温度が振動することが大きな課題であった。そこで我々は市販の GM 冷凍機に FRP ダンパーを適用することで、4.2K 付近で温度振動を 0.2mK 以下の分散に抑え、3.5000K～300.000K 各温度での温度制御を可能とする方法を提案した [1, 2]。今回、温度のサンプリング周期をディスプレイの振動周期よりも短くし、温度振動のリアルタイム測定を行った。

2. 実験方法

本研究で用いた低温測定装置の概念図を Fig.1 に示す。使用した GM 冷凍機は住友重機械工業(株)製、SRDK-101D である。温度振動を軽減するため、クライオヘッド直下に FRP ダンパーを設置した。その下に銅ブロックを設置し、これに内蔵されたメインヒーター (50 Ω) で温度の粗制御を行った。さらに温度振動を軽減するため、銅ブロックとその下の試料ステージの間にも FRP ダンパーを設置した。試料ステージにはサブヒーター (0.25 Ω @4.2K) が内蔵されており、これにより温度の微調節を行った。温調を行うための温度センサーには校正された Cernox 温度計を用い、温度調節器には LakeShore 社製 340 Temperature Controller を使用した。さらに、温度のリアルタイム測定を行うため、シリコンダイオード温度計をクライオヘッド、銅ブロック、試料ステージの3箇所に設置した。

3. 実験結果と考察

シリコンダイオード温度計を用いて温度のリアルタイム測定を行った結果の一例を Fig.2 に示す。図のインセットは銅ブロック、試料ステージの温度振動のみをプロットした図である。FRP の厚さはクライオヘッドで 1.12mm, 試料ステージで 0.76mm のものを用い、試料ステージ温度を 5K に PID 制御した。クライオヘッドの温度振動は約±150mK であったのに対し、銅ブロックでは±4mK, 試料ステージでは±1mK と、大きく軽減された。

クライオヘッド FRP の厚さを変えたときの温度振幅及び試料ステージの最低到達温度を Fig.3 に示す。FRP を厚くすると温度振幅は小さくなるが、最低到達温度は上がることを確認した。また、温度振幅、最低到達温度共に飽和する傾向となった。

以上のように、FRP ダンパーを適用した GM 冷凍機における温度のリアルタイム測定を行った。求められる温度振動及び到達温度を考慮して、FRP の厚さを決定することが重要であるといえる。また、今回はクライオヘッド FRP のみ厚さを変えて測定を行ったが、試料ステージ FRP の厚さも最適化することで、さらなる温度振動の軽減が期待される。

謝辞

本研究の一部は、(財)日本科学協会笹川科学研究助成を受けて実施された。

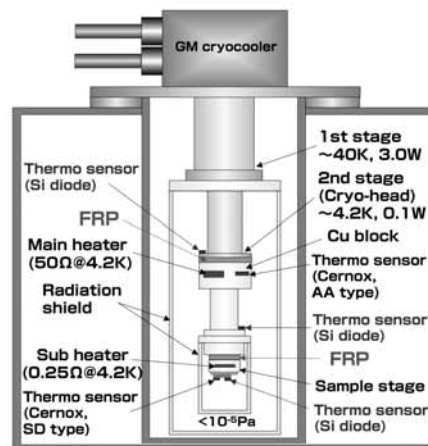


Fig.1 Experimental setup of the cryostat using a cryocooler.

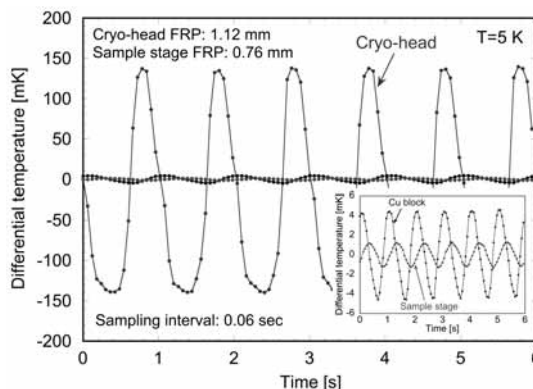


Fig.2 Time series of the real-time temperature using Si diode.

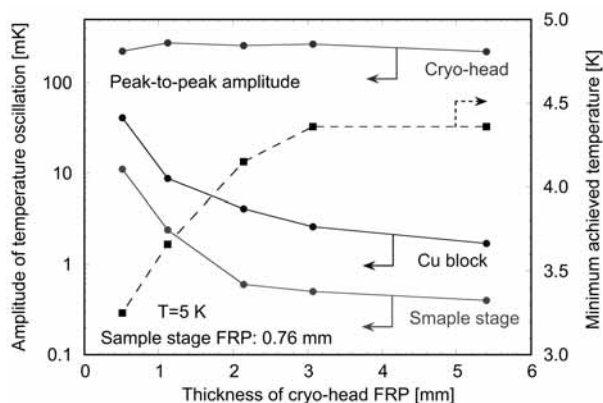


Fig.3 Peak-to-peak amplitude of the temperature oscillation using various thicknesses of cryo-head FRP.

参考文献

1. D. Nakamura, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.47
2. Y. Hasegawa, D. Nakamura, et al.: Review of Scientific Instruments, Vol.81 (2010) p.094901

動作圧力による GM 冷凍機の冷凍能力への影響

Effect of the charged pressure on the GM cryocooler performance

根塚 隼人, 中込 秀樹(千葉大);沼澤 健則(NIMS);増山 新二(大島商船高専);中島 錦, 池谷 陽一郎(住重)
 NEZUKA Hayato, NAKAGOME Hideki (Chiba University);NUMAZAWA Takenori (NIMS);
 MASUYAMA Shinji (Oshima National College);NAKASHIMA Nishiki, IKEYA Yoichiro (SHI)
 E-mail: nezuka@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

GM 冷凍機は宇宙望遠鏡のような観測装置、医療用の MRI 超電導体の冷却などの分野で利用されている。GM 冷凍機は差圧を増大させることにより冷凍能力が向上し、圧力比の低減により COP(成績係数)が向上することが確認されている[1]。

本実験では高差圧、低圧力比を実現する為に GM 冷凍機を高圧動作させ、GM 冷凍機の効率向上を目的とした。加えて、冷凍機のサイクル周波数変更時の性能評価も行った。

2. 実験装置

本実験では、高圧に対応した耐圧コールドヘッドと高圧コンプレッサを組み込んだ圧縮機ユニットを開発設計した。性能評価をするための比較対照として SHI 製である 0.1W@4.2K の RDK-101D を使用した。蓄冷器は 1 段目に銅メッシュの蓄冷材を使用し、効率比較を単純化する為に 2 段目にバークライトの中実棒を挿入することで擬似的に単段にて評価を行った。

3. 実験方法

動作圧力変更の性能評価では作動流体であるヘリウムガスの圧力を実験機では 2, 4, 6MPa、比較対照である RDK-101D では 1.95MPa の測定を行った。それぞれの測定はヒーターによる熱負荷を 0, 3, 6, 9, 12, 20w を入力したときの冷凍能力、効率の比較を行った。また、冷凍機周波数変更の性能評価では周波数を 1.0, 1.8, 2.0Hz に変更し、測定をおこなった。本実験では効率の指標として冷凍温度が異なる冷凍機の効率を比較できる%カルノーを使用した。%カルノーは(1)、(2)式のように実際の COP と理想的な COP の比で示される。

$$COP_{real} = \frac{\text{Refrigeration capacity}}{\text{Compressor electric power}} = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

$$\%Carnot = \frac{COP_{real}}{COP_{carnot}} \times 100 \quad (2)$$

4. 実験結果

Fig.1 に冷凍機回転周波数を変更した際の冷凍能力を示す。周波数を向上させることで%カルノーは増加することを確認した。Fig.2はそれぞれの封入圧力の際の%カルノーを示す。熱侵入の影響により実験機の%カルノーはRDK-101Dよりも低くなった。しかし、12w 以上の熱負荷を加えた場合、実験機の 4、

6MPa において%カルノーが向上することを確認した。

5. まとめ

動作圧力を高圧にしたときの GM 冷凍機の冷凍能力評価を行った。蓄冷器を単段にした際には実験機よりも RDK-101D の%カルノーのほうが上回った。実験機の冷凍不良の原因は熱侵入によるものだと考える。詳しい冷凍不良の原因については講演にて報告する。今後、蓄冷器を 2 段にした性能評価と同時に蓄冷器解析ソフトである REGEN3.3 にて高圧動作時の解析を行う予定である。

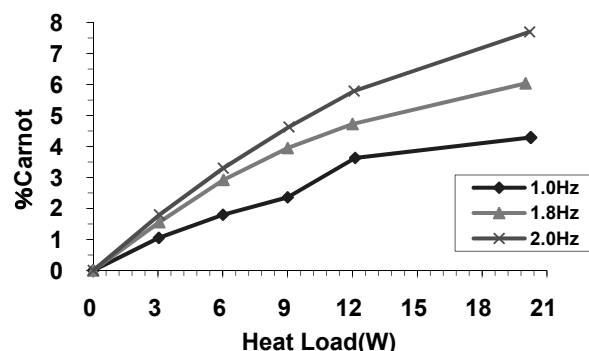


Fig. 1:%Carnot for three operating frequencies

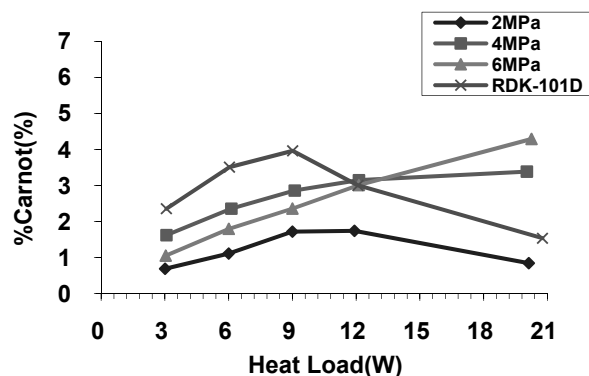


Fig. 2:%Carnot for different charged pressures

参考文献

[1]H.Nakagome, et al., "Research on Improvement in the Efficiency of the GM Refrigerator" *Cryocoolers 14*, ICC Press, Boulder, CO(2007), pp. 187-193.

20K スターリング型パルス管冷凍機の開発 Development of 20K Stirling-type Pulse Tube Cryocooler

石渡 洋志, 市川 博亮, 岩田 展幸, 山本 寛(日本大学); 増山 新二(大島商船高専);
玉田 勉, 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

ISHIWATA Hiroshi, ICHIKAWA Hiroaki, IWATA Nobuyuki, YAMAMOTO Hiroshi(Nihon Univ.);
MASUYAMA Shinji(Oshima National College of Maritime Technol.);

TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Kouji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo(Chubu Electric Power Co.)

E-mail: hyama@ecs.cst.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

我々は SMES 用の超電導マグネット冷却を目的として、20K スターリング型パルス管冷凍機の開発を行っている。そこで、20~50K の低温域での冷凍機の性能向上のため、2 段スターリング型パルス管冷凍機を作製し、その冷凍動作の検討を行っている。今回、その一環として、液体窒素を用いて冷却したステージに 1 段冷凍機を設置した仮想的 2 段冷凍機ならびに 2 段冷凍機システムを動作させたので報告する。

2. 実験方法

2 段冷凍機システムの概略図と写真を Fig.1 に示す。1 台のリニア対向型圧力振動源に対し、1 段目と 2 段目が並列して動作する。このとき、イナータンスチューブ間はバルブを介して連結させた。振動源の最大投入電力約 4~6kW、動作周波数は 50~60Hz とした。1 段目パルス管 (a) の内径 $\phi 38.1\text{mm}$ 、長さ 202mm、2 段目 (b) は比較的小さく、 $\phi 20\text{mm}$ 、100mm とした。(c) の共通蓄冷器は内径 $\phi 80\text{mm}$ 、長さ 100mm、2 段目蓄冷器(d) は $\phi 38.1\text{mm}$ 、長さ 73mm とした。蓄冷材料として、SUS250~400 メッシュを積層化したものを用いた。

パルス管の基本動作を解析するため、Fig.2 に示す熱交換器上に 2 段目パルス管のみを設置し、仮想的 2 段冷凍機とした。周辺システムは前回の報告⁽¹⁾と同じもので、CFIC 社のリニア対向型圧力振動源 (ピストン最大変位 16mmP-P、最大投入電力約 4kW、動作周波数は約 55Hz) を使用した。熱交換器内部には SUS100 メッシュを積層し、液体窒素により冷却した。動作時の圧力測定は振動源、イナータンス入口、そしてバッファタンク終端の 3 箇所で行った。

3. 結果

イナータンス径や長さを変化させ、仮想的 2 段実験におけるピストン変位と圧力のリサージュを評価しながら、PV 仕事、最適動作条件を検討した。Fig.3 にその一例を示す。前回報告した比較的大きなパルス管の場合と比較し、イナータンス部での圧力波はやや大きな (約 30°) の位相遅れとなった。PV 仕事については、動作条件によって大きく変化し、明確な傾向は見出せてはいない。

一方、2 段冷凍機の動作時、イナータンス連結バルブを調整し、作業気体の還流量と冷凍性能についても検討したが、完全に閉じた場合には冷凍特性は劣化する傾向が見られた。

一連の冷凍機動作結果の詳細については当日報告する。

4. 謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「リチウム系超電導電力機器技術開発」の一環で実施したものである。

参考文献 (1) 石渡 他, 2010 年春季低温工学・超電導学会, IC-P02.

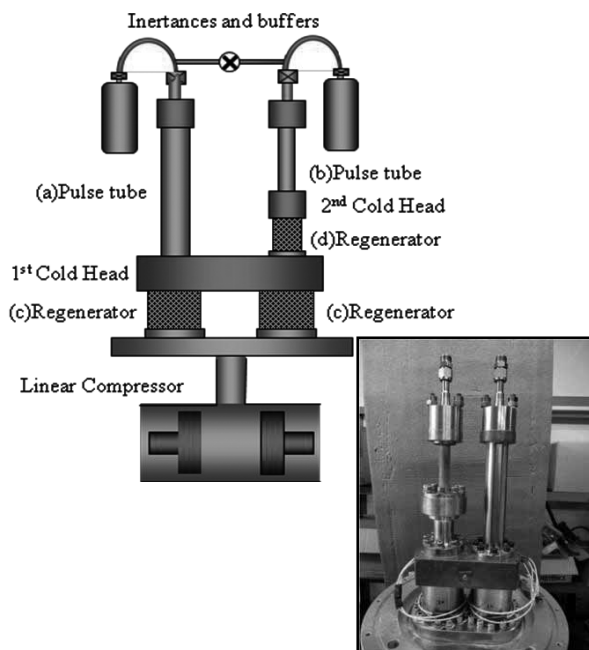


Fig. 1 Schematic view and photo of the two-stage pulse tube cooler system.

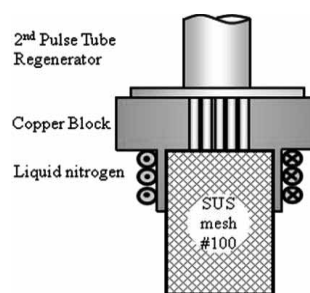


Fig. 2 Schematic view of the heat exchanger for the pseudo-two stage pulse cooler operation.

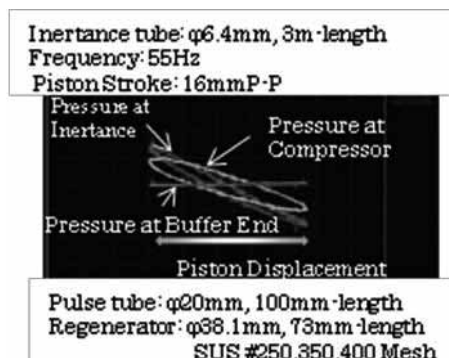


Fig. 3 Example of the pressure-piston displacement lissajous.

液体水素自動車に搭載を目的とした 20K 冷凍機の研究開発

Development of 20K cryocooler for Liquid hydrogen automobile

彦根 昂仁, 相原 裕樹, 山根 公高(東京都市大)

HIKONE Takahito, AIHARA Hiroki, YAMANE Kimitaka (Tokyo City Univ.)

E-mail: kyamane@tcu.ac.jp

1. はじめに

本研究室では水素内燃機関自動車の研究開発を行っている。高積載量の理由から、水素の車載方法には液体水素を採用しているが、液体水素タンクへの熱侵入によりボイルオフガスが発生する。そこで、ボイルオフガス低減のために、液体水素自動車に搭載する 20 K 冷凍機の検討を開始した。初めに、1 段式GM型パルス管冷凍機を試作し、作動流体の圧力波形が冷凍能力に大きく寄与することを知見として得た。そこで、圧力波形を自在に変化させることのできるモーションコントローラー(以下、MC)を開発し、ロータリーバルブ(以下、RV)の制御に用いたので、試験結果などについて報告する。

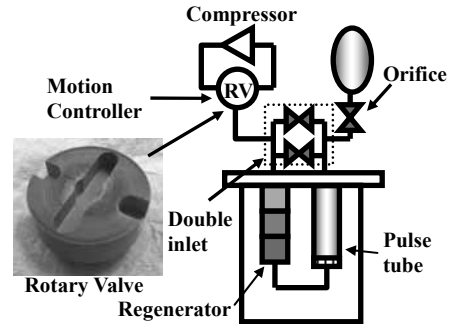


Fig.1 Experimental Apparatus

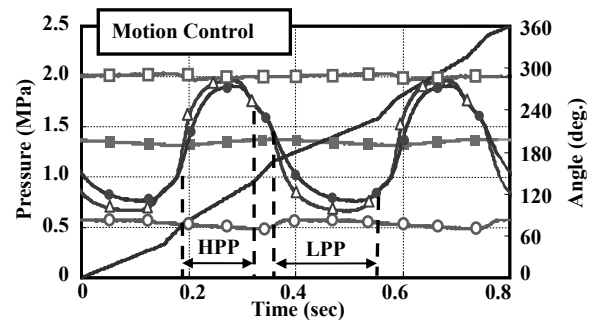
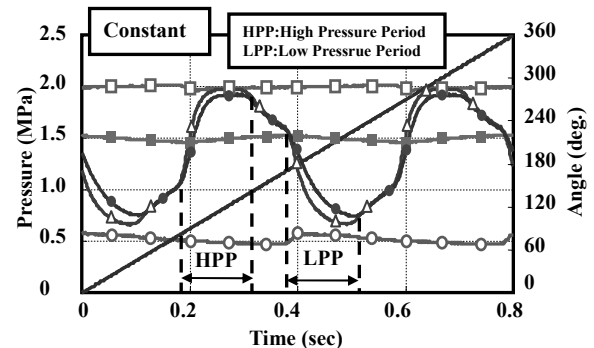
2. 実験装置

Fig.1 に実験装置を示す。パルス管は内径 20 mm、長さ 194 mm、蓄冷器は内径 30 mm、長さ 120 mm である。蓄冷器には高温端部から長さ 1/3 の部分に 300 メッシュ、中央部の長さ 1/3 に 400 メッシュの金網、残りの部分に $\phi 0.2$ の鉛球を充填した。位相制御機構にはダブルインレット方式を用いており、容積 2L のバッファタンクを設置した。

RV は 1 回転で 2 波長の圧力波形を形成する。モータにはステッピングモータ($0.9^\circ / \text{step}$ →ハーフステップ駆動)を採用した。モータ制御には MC を導入し、ハードウェアは Interface 社の PCI-7404V、ソフトウェアは Labview を用いて制御を行った。

3. 実験結果

Fig.2 に RV を一定速度で回転させた場合(上図)とモーションコントロールを行った場合(下図)での、1 サイクルにおける各部圧力波形とモータ位置をそれぞれ示す。RV 一定速度回転の結果より、パルス管および蓄冷器内での低圧行程(Fig.2 上図の LPP)における圧力低下が不十分であったため、モーションコントロール制御では、低圧行程のバルブ開度時間を長くした。Table.1 にバルブ開閉角度と入力値の関係を示す。速度信号(pps) は 2.5 Hz での駆動値を表す。なお、入力ステップ数は使用するバルブ形状によって異なる。Fig.3 に冷凍能力の試験結果を示す。MC の導入により、RV を一定速度で駆動させた場合に比べて、冷凍性能が向上することが分かった。



□ Supply ○ Return ▲ Regen. • PT ■ Buffer tank — Motor Angle

Fig.2 Pressure Waves and Motor Angle

Table.1 Input Data for Motion Control

	Rotary Valve	Motion Control	Input data	
			(pps)	(step)
HPP	58.4° →	58.2°	502	65
Close	30.5° →	17.3°	882	34
LPP	60.6° →	87.2°	374	67
Close	30.5° →	17.3°	882	34

4. 結論

RV を MC で制御することにより、冷凍機内の圧力波形を自在に変化させることが可能となった。今回はモーションコントロールの精度を確認する実験のみを実施し、圧力波形の最適化を行っていないため、モーションコントロールの最適化により、さらなる冷凍性能や効率の向上が見込まれる。

5. 今後の展開

数値シミュレーションを行い、試作した冷凍機の最適バルブ開度を求め、モーションコントロールに適応させて冷凍性能の向上を行う。

参考文献

- Y. Matsubara, cryocooler (5)-Fundamental Review of Cryogenic Refrigerators-

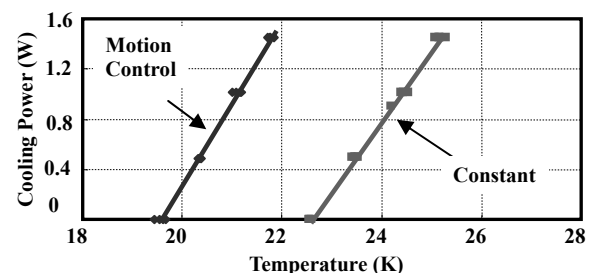


Fig.3 Cooling Power

アクティブ型熱音響機器におけるエネルギー増幅特性評価

Energy flow analyses for the active type thermoacoustic device

加藤 直樹(名大); 前川 龍司(ITER);

岩本 晃史, 鷹見 重幸(NIFS); 東井 和夫(NIFS, 名大)

KATO Naoki (Nagoya Univ.); MAEKAWA Ryuji (ITER);

IWAMOTO Akifumi, TAKAMI Shigeyuki (NIFS); TOI Kazuo (NIFS, Nagoya Univ.)

E-mail: kato.naoki@lhd.nifs.ac.jp

1. はじめに

近年、環境・エネルギー問題に関連して、熱音響現象[1]を利用した発電機が研究されている。主流である自励振動型に対して、機器内の音場を能動的に制御するアクティブ型は、共振条件に影響される自励振動型よりも広い駆動範囲を持つことができる。

これまで、アクティブ型熱音響機器のエネルギー増幅特性を把握するために、特性実験を進めてきた[2]。今回は、さらなるエネルギー増幅率向上のため、熱音響変換ユニットを2段階持つカスケード式を構築し、従来装置(ユニット1段)との比較検討をおこなった。その際、各実験パラメータ(入力電力、ヒータ温度、再生器メッシュ数)を変化させて、これらのパラメータがエネルギー増幅特性に深く関わる仕事流へ及ぼす影響を調査した。また、装置内の圧力損失による影響についても検討した。

2. アクティブ型熱音響装置および解析モデル

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。オリフィスパルス管冷凍機と同様な構成になっており、バッファタンクはオリフィス弁を介して仕事輸送管と接続されている。また、PWG(音響エネルギー発生装置)には、CFIC 社のリアコンプレッサを採用した。機器内には、気体ヘリウムを約2.25MPa 封入している。エネルギー増幅を担う熱音響変換ユニットは、再生器、高・低温熱交換器(図中表記は、HHX,LHX)、仕事輸送管で構成されている。カスケード式では、このユニットを2段に縦列接続している。再生器として、SUS316 メッシュを28mm 積層した。熱交換器(銅製)は直径53.5mm、長さ24mm で、流路断面には放射状のスリットがある。高温部熱交換器の温度は、ヒータ入熱量を調節することで一定に保たれており、低温部熱交換器(冷却水:300K)との温度比を維持している。また仕事輸送管(SUS304 製)は、内径40mm、長さ28mm である。

実験装置に対応したカスケード式の解析モデル[3]は、Fig.1 と同じ構成である。圧力変動の異なる5つのセクション(PWG 背圧部分、ピストン圧縮空間、1段目および2段目仕事輸送管内、バッファタンク内)の圧流バランスを考慮するため、下記の方程式を利用している。それぞれ、再生器およびオリフィス弁を通過する質量流量、ピストンシリンダ間でのガス漏れに対応している。

$$\frac{dm_{bc}}{dt} = ALF_{bc}(P_1 - P_{bc}), \frac{dm_r}{dt} = ALF(P_1 - P_2)$$

$$\frac{dm_{r2}}{dt} = ALF_2(P_2 - P_3), \frac{dm_b}{dt} = ALF_b(P_3 - P_b)$$

ここで、P:圧力、m:質量流量、ALF:流量係数である。また、サブスクリプトは、c:PWG、r:再生器(1段目)、r2:再生器(2段目)、b:バッファタンク、bc:PWG のバックボリュームを表している。

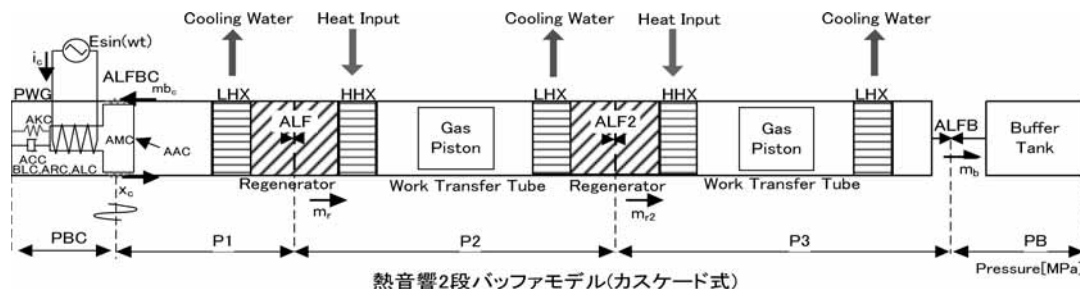


Fig.1 The active type thermoacoustic device

3. 特性実験

再生器メッシュ数(150、200[inch⁻²])、PWG への印加電圧(10~60[V])、高温部熱交換器温度(350~623[K])と条件を変化させて、仕事流へ及ぼす影響を調査した。実験では PWG 運転周波数を60[Hz](共振周波数)に設定している。また各々の条件において、オリフィス弁での流量係数(Cv 値)を調節することで、内部振動流体の流速と圧力振動との位相差を制御している。これにより、進行波・定在波成分の比率を変化させ、仕事流への影響を調べている。以上の実験を通して、熱音響変換ユニット1段および2段(カスケード式)の機器特性を比較検討した。

仕事流は、実験より得られた圧力変動データとシステムのエネルギーおよび質量保存を記述した方程式群の数値シミュレーション結果との比較から評価した。また再生器前後における仕事流の増幅分を、エネルギー増幅分としている。

4. 特性評価

エネルギー増幅特性(実験条件...高温熱交換器温度:623K、印加電圧:40V、再生器メッシュ数:200[inch⁻²])をFig.2に示す。従来装置(ユニット1段)、カスケード式における最大エネルギー増幅率は、それぞれ約1.5倍、約2.15倍であった。このことより、当条件においては、熱音響変換ユニットを2段(カスケード式)にしたことで、エネルギー増幅率向上を達成できたことが分かった。

圧力損失による影響や各実験パラメータの依存性などの詳細な内容については、当日報告する。

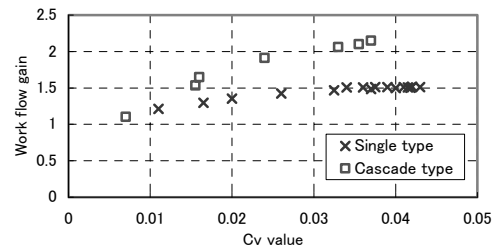


Fig.2 Work flow gain with two types of the device

参考文献

- [1]G. W. Swift, "Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators", Acoustical Society of America (2002)
- [2]N. Kato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p.73
- [3]R. Maekawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.152

大学における高圧ガス管理の現状と課題

Current situation and issues of high-pressure gas administration in university

百瀬 英毅 (大阪大)

MOMOSE Hideki (Osaka Univ.)

E-mail: momose@mat.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

平成 16 年 4 月、文部科学省の外局であった国立大学は国の行政機構から離脱し、国立大学法人として法人格を有することになった。これに伴い、従来は人事院規則に基づき行われていた対応が労働安全衛生法へと変更されるなど種々の変化があった。一方、高圧ガスに関しては、従前から高圧ガス保安法が国に対しても適用されていたため、大きな変化はないだろうとの予想もあった。しかし実際には、法人としての単位が明確化したために対応が変更されるなど、その影響が法人化後に顕在化した点もある。そこで本発表では、大阪大学における高圧ガス管理の現状を紹介するとともに、大学法人化によって明らかになった高圧ガス管理に関する現状と課題について概観する。

2. 大阪大学における高圧ガス管理体制

大阪大学では、以前は部局(研究科、研究所、センターなど)ごとに高圧ガスに関する法的手続きを行っていた。しかし、大学法人化を契機に行政当局と協議が行われ、法人としての窓口を一本化すること、民間企業と同様に地続きである一つの敷地は原則一つの事業所とすること、などが求められ、対応が進められてきた。そこで、大学法人化の際に労働安全衛生法対応を主要業務として創設された安全衛生管理部が高圧ガス関係も所掌することになり、学内において最大の処理量をもつ高圧ガス製造施設であった低温センターは、その関連センターに位置づけられた。そして、センターから教員 1 名が安全衛生管理部の兼任教員として派遣される形式をとり、大学全体の高圧ガス保安法に係わる統括業務に従事することになった。

このような業務を担当するようになったことに加えて、大学の高圧ガス担当者として他大学の担当者や情報交換や協議する機会が新たに生まれた。そこで、これらの中から見えてきた国内の大学における高圧ガス管理における課題を取り纏めることとした。

3. 大学における高圧ガスに関する課題

3.1. 貯蔵所について

高圧ガス保安法では、「貯蔵」について、その貯蔵量に応じた段階的な規制が設けられている。多量になるほど厳しい規制になり、貯蔵量が最も多い第一種貯蔵所となると、貯蔵所を設置すること自体が都道府県知事の許可対象となる。そして、一旦許可を受けた貯蔵所は、改修などによる構造の変更や、保管するガス種類を変更する場合ごとに再度事前に許可を受けなければならない。

大学の研究室では、多種多様なガスが使用されて研究が行われており、その種類を変化させながら、時期的な増減を繰り返して存在している。このため、毎回行政当局に許可を求めながら研究を進めるのは現実的ではない。このため、多くの大学において規制の少ない第二種貯蔵所や容器置場とする努力が払われている。

3.2. 貯蔵量の計算方法について

貯蔵所のランク分けの基準となる貯蔵量の計算方法は経済産業省からの通達によって細かく規定されている。特に高圧ガス容器間の距離が 30m 以内であれば貯蔵量を合算する

“30m 則”と呼ばれるものがある。“30m 則”に従い貯蔵量を計算しようとする、学内のボンベが次々と数珠繋ぎに連結してしまい、キャンパス全体にまで広がってしまう場合もある。学内における実際の運営や管理の実態と乖離した巨大な高圧ガス貯蔵所が出現する事態に至る。一方で、上述したように第一種貯蔵所を避ける流れもあるため、担当者が必要以上に頭を抱える事態が発生する。ちなみに、消防法による危険物に関しては、このような合算規定はない。

3.3. 貯蔵量の管理方法について

貯蔵量を抑えて第二種貯蔵所や容器置場にしようすると、法令で定める上限値を超えていないか確認する必要が生ずる。従来、大学では研究室単位で物事が動いていたため、研究室を横断して高圧ガス貯蔵量を集計することは容易ではない。特に、学科・専攻、学部・研究科を越えて集計することは非常に大変な作業となる。そこで、幾つかの大学では、高圧ガスの購入、ボンベの返却情報を電子的に記録する管理システムを導入し始めている。

3.4. 貯蔵方法について

そもそも、大学の実験室に置かれるボンベは「貯蔵」状態なのか、「消費」状態なのか、という基本的な問題がある。「貯蔵」状態と解釈すると、実験室などが入る鉄筋コンクリート建ての校舎は高圧ガス貯蔵所と理解すべきなのか、という次の問題に突き当たる。可燃性ガスを置くボンベ庫は経済産業省令で一階建となっているため、ある地域では可燃性ガスボンベは 2 階以上に持って上がれないという話を聞いたことがある。

このような問題を回避する方法としてシリンダー・キャビネットというボンベ収納設備を設ける方法がある。シリンダー・キャビネットについては設備要件が経済産業省より例示基準として提示されている。例示とはいうものの事実上は設備としての必須基準として扱われ、1 台数百万円に及ぶ高額設備になり、キャンパス全体に導入するには億単位の予算が必要となる。

3.5. 処理量が極めて少ない製造設備

教育研究用の実験装置の中には、極めて少量ではあるが高圧ガスの製造を伴うものがある。例えば、超臨界状態の二酸化炭素を利用した試料乾燥装置が好例である。このような設備に対しては、現行の高圧ガス保安法は過大な保安を求め、教育研究を萎縮させている。

3.6. その他

従来から言われていることであるが、都道府県による対応の差異、保安係員の配置義務により無人運転ができないなど諸外国に比べて必要以上に厳しい規制などの問題がある。

4. まとめ

以上のように、現行の高圧ガス保安法とその関連政省令等は大学における研究実態に合わない部分が多い。諸外国に比べて過重な負担は教育研究力を削ぎ、延いては我が国の産業などにも影響を与える。大学法人化により適法化が進められること自体は良い事であるが、そもそも法令が大学などの教育研究機関を想定していない場合には、法令等に対応させるように修正する努力が合わせて必要である。

南極昭和基地超伝導重力計(#058)の設置

Installation of superconducting gravimeter (#058) at Syowa Station, Antarctica

池田 博 (筑波大学) 青山雄一、早河秀章、土井浩一郎、澁谷和雄 (極地研)

IKEDA Hiroshi, (University of Tsukuba), AOYAMA Yuichi, HYAKAWA Hideaki, DOI Koichiro, SHIBUYA Kazuo (NIPR)

E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

南極昭和基地では1993年から10KタイプGM冷凍機を装備した超伝導重力計 (TT-70#16) による重力の連続観測が初めて行われた。2003年からは4KタイプGM冷凍機を装備した液体ヘリウム再凝縮型の小型超伝導重力計 (CT#043) に更新され、2009年12月末まで連続観測を行った。これまでの超伝導重力計によって地球上の重力を測定して地球内部の動きや地球自由振動の測定により地球の動的特性を解明しようとしている。今回、第51次南極地域観測隊夏隊により第3世代の超伝導重力計 (CT#058) を導入したので日本から昭和基地までの輸送と昭和基地での立ち上げ結果、さらに2月末に起きたチリ大地震の観測結果について報告する。

2. 超伝導重力計の輸送

南極昭和基地における超伝導重力計による精密重力観測を実現するためにはいくつかの問題を解決しなければならない。最大の問題は輸送である。南極昭和基地までの14,000Kmに及ぶ距離を超精密な超伝導センサーの入っている液体ヘリウムを溜めるためのクライオスタット及び真空断熱槽にダメージを与えることなく輸送することである。輸送は新砕氷艦「しらせ」によって日本から約1カ月の航海で暴風圏を経て昭和基地に向かう。今年は定着氷が厚く「最大氷厚 4.3m」を突破しなければ昭和基地にたどり着くことが出来なかった。装置が昭和基地に到着時点で真空断熱槽に性能低下が生じないように梱包の段階で2重3重にも防振対策を行い、厳しい条件の輸送に対応した。幸い、今回は新「しらせ」の就航により暴風圏での揺れも例年の半分 (最大片側 19度) であった。さらに新型の大型ヘリコプターの導入により初めて後部ハッチからの荷物搬入が可能となり超伝導重力計の定着氷から昭和基地までの輸送にも利用され輸送の効率化が実現して、無事に南極昭和基地までの超伝導重力計と液体ヘリウム

の輸送を行うことが出来た。なお、南極にある超伝導重力計は日本の昭和基地が唯一の装置であり重要な観測点となっている。

3. 昭和基地での超伝導重力計の立ち上げ

第51次南極地域観測隊 (JARE51) により「しらせ」から12月18日に南極昭和基地の重力計室に観測機器、液体ヘリウムがヘリコプターにより昭和基地に空輸され、昭和基地内でも細心の注意を払ってヘリポートから重力計室に運搬された。立ち上げ作業は最初に断熱真空槽の真空引きを2日間行い最終真空度は 2.5×10^{-5} Torr であった。さらに液体窒素による予冷を行い1晩経過してセンサー一部が液体窒素温度 77Kになったことを確認してから液体窒素の追い出しを行った。液体窒素追い出し後、液体ヘリウムのトランスファーは日本から持ち込んだ60リットルヘリウム容器からクライオスタットに行いモニターで監視しながらヘリウム液面が100%までトランスファーを行った。その後、傾斜調整、超伝導球のレベテーションの順に行い、12月24日には潮汐信号の観測を確認した。その後、最終調整を行って2010年1月7日より定常連続観測を開始した。昭和基地からインテル衛星を介してネットワークを通して、日本でWebカメラによる観測状態の確認、観測データの取得が可能となった。Fig.1に最終的な新超伝導重力計の全体配置図を示す。



Fig.1 Superconducting Gravimeter

冷凍機伝導冷却型二酸化炭素固体プレート製作装置の構築

Construction of carbon dioxide solid plate production apparatus by cryocooler conduction cooling

増山新二, 藤中潤也(大島商船高専); 梶谷守洋(M&E); 田村亮祐, 西村隼人(竹和工業)
MASUYAMA Shinji, FUJINAKA Junya(Oshima National College); MASUTANI Morihiro(M&E);
TAMURA Ryosuke, NISHIMURA Hayato(TAKEWA INDUSTRIES)
E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

近年, グリーンハウスガスの一つである二酸化炭素(CO₂)の排出量を減少させる取り組みが各方面から実施されている。つまり CO₂ は, 厄介者扱いされることが多いが, 応用方法によっては, 利用価値の高い分野が存在する。その一つが, ドライアイスプラスト洗浄である。様々な産業・工業分野で注目されているこの洗浄法の利点は, 二次廃棄物が発生しない, 研磨剤を必要としないなどが挙げられる。

本研究の目的は, 優れた性能を有するドライアイスプラスト洗浄の洗浄能力を向上させることである。このためには, 結晶粒の小さなドライアイスではなく, 固体の CO₂ プレートが必要であることに着目し, 冷凍機伝導冷却型二酸化炭素固体プレート製作装置を構築した。以下に, 装置の概要ならびに冷却特性を述べる。

2. 固体 CO₂ プレート製作方法の概念

CO₂ の状態特性図を Fig.1 に示す。CO₂ は無色無臭の気体であり, 標準大気圧では液体にならない。つまり, -78.5°C @1atm のドライアイスが室温で使用すると, 昇華を起し, 気体となる。まさに”ドライ”の状態であり, これがドライアイスプラスト洗浄の利点の一つでもある。

Fig. 1 より, CO₂ の固体を製作するためには, 温度と圧力が関係することが分かる。われわれは, 製作効率の観点から, 加圧した CO₂ ガスを三重点(-56.6°C@5.11atm)以下に冷却する方法を選択している。

3. 固体 CO₂ プレート製作装置

Fig. 2 に固体 CO₂ プレート製作装置の概略図を示す。1 段 GM 冷凍機(RF90S, 鈴木商館)の熱伝導で, 冷却ボックス(横:37cm, 縦:18cm, 深さ:35cm)を冷却する。冷却ボックスは, 冷凍機のコールドヘッドと熱接触している底面部が銅製で, 側面部は厚さ 10mm のステンレス製である。冷却ボックス上面部は真空フランジと接続される。この冷却ボックスに高純度エタノール溶液を満し, その中に CO₂ ガスを入れたステンレス容器(CO₂ 容器)を上部から挿入する。つまり湯煎状態で, 固体プレートを製作する。製作される CO₂ プレートの厚さは, 約 1cm である。なお, 現在のところ GM 冷凍機にモディファイは加えていない。

4. 冷却試験

冷却試験を行うために, 冷却ボックスにエタノール溶液を 18.5L 注入した。このときの液面高さは, 底面から 27cm となった。温度を計測するため, エタノール溶液中に, 三つの白金温度計 A, B, C を底面からそれぞれ 24cm, 15cm, 1cm の高さに設置した。なお, エタノール溶液の上面は大気に開放されている。

Fig. 3 に冷却試験結果の一例を示す。冷却試験は, 定期的な手動攪拌しながら行われた。攪拌することで, 溶液全体の温度が均一になっていることが分かる。結果より, 室温から冷却開始後, 約 9 時間で溶液全体が CO₂ の三重点以下の温度となった。また, 9 時間以後, 溶液全体に温度差が生じていないのは, 連続的に攪拌したためである。

5. まとめ

ドライアイスプラスト洗浄の洗浄力向上を目的として, 1 段 GM 冷凍機を使用した冷凍機伝導冷却型二酸化炭素固体プレート製作装置を構築した。エタノール溶液を満した状態で冷却試験を行ったところ, CO₂ の三重点である -56.6°C に約 9 時間で到達した。

今後は, 攪拌方法や, エタノール溶液の量などの検討を加えながら, 実際に CO₂ プレートの製作を行う予定である。

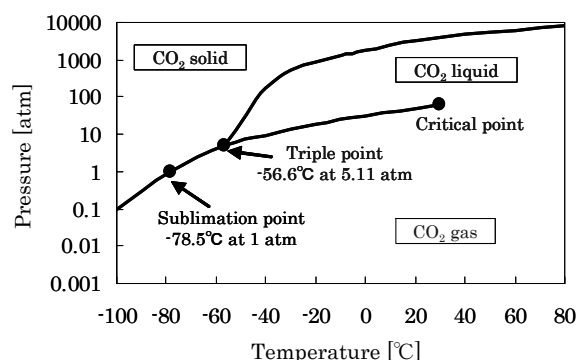


Fig.1 Pressure-Temperature phase diagram for CO₂

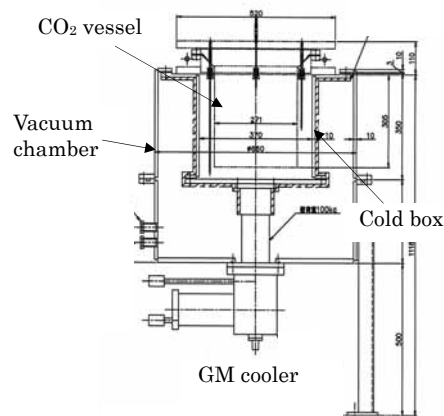


Fig.2 A schematic of the CO₂ solid plate producing apparatus

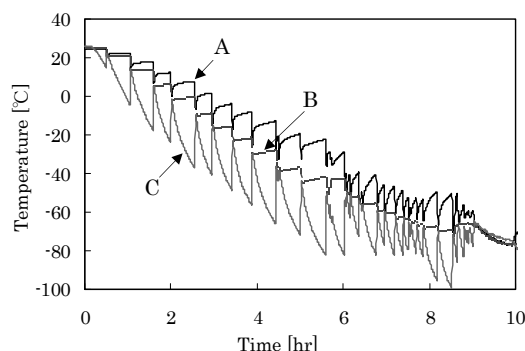


Fig.3 Cool down characteristics

水素吸蔵合金タンクの液体水素蒸発ガスに対する吸蔵・放出特性に関する研究

Study on absorption/desorption characteristics of the metal hydride tank for boil-off gas from liquid hydrogen

中納 暁洋, 前田 哲彦, 伊藤 博 (産総研); 増田 正夫, 川上 理亮, (高砂熱学);

丹下 学 (芝浦工大); 西田 恵一 (東工大); 高橋 徹 (筑波大)

NAKANO Akihiro, MAEDA Tetsuhiko, ITO Hiroshi (AIST); MASUDA Masao, KAWAKAMI Yoshiaki (TTE Co.,Ltd.);

TANGE Manabu (Shibaura Inst. Tech.); NISHIDA Keiichi (Tokyo Tech); TAKAHASHI Toru (Univ. of Tsukuba)

E-mail : a.nakano@aist.go.jp

1. はじめに

我々は統合型水素利用システムに関する研究を進めている。水素貯蔵には水素吸蔵合金タンクを採用しLaとNiを含むAB₅系合金を使用している。本システムの運用では液体水素のボイルオフガス(BOG)を水素吸蔵合金タンクに貯蔵・利用するケースも考慮している。液体水素のBOGはほぼ全てパラ水素で構成され、我々が普段使用しているノーマル水素とは若干異なる熱物性を示す。LaNi₅合金に触れたパラ水素はノーマル水素への変換が他の合金に比べて早く進むという報告¹があったことから、開発した水素吸蔵合金タンクに液体水素BOGを吸蔵・放出させその諸特性について調査した。

2. 実験装置

実験装置の概略をFig. 1に示す。BOGの吸蔵試験は、まず水素液化機内容器に溜めた液体水素を容器底部の真空断熱槽側に設置したヒーターで加熱し蒸発を促し所定圧力0.2MPa_(gauge)に達するのを待つ。次に消費ラインのバルブを開けBOGを昇圧ポンプに導き0.95MPa_(gauge)に昇圧したガスを水素吸蔵合金タンクに吸蔵させた。一方、放出は屋外へと繋がる放出ラインを開放した。消費・放出ラインにはマスフローコントローラを設置し水素ガス流量を計測した。水素吸蔵合金タンク内には合金が50kg充填されており、また熱利用のための熱交換チューブが設置されている。図中左に恒温槽を用いて循環水入口温度を制御し、出口側との温度差、及び循環水流量から吸蔵・放出時における利用可能反応熱量を求めた。なお、ノーマル水素の吸蔵試験は水素ボンベから直接ガスを供給し実験を行った。

3. 実験結果

統合型水素利用システムの定格運転条件、循環水入口温度32℃、循環水流量1.00L/min、水素流量10NL/minで9時間吸蔵、循環水入口温度12℃、循環水流量0.41L/min、水素流量7NL/minで13時間放出を行った時の実験結果をFig. 2に示す。Fig. 2aはP-C曲線、Fig. 2bは循環水温度差の時間変化を表す。なお、数値解析は吸蔵過程のみを行い実験結果と比較している。まず両図が示すようBOGとノーマル水素の実験結果の間に有意な差は認められなかった。また、Fig. 2aでは実験結果と数値解析結果が非常に良く一致してい

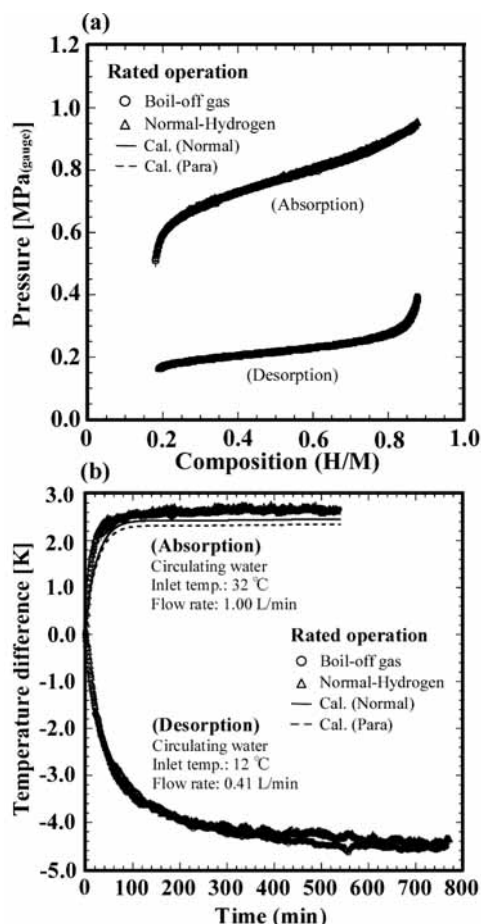


Fig. 2 Experimental results for the rated operation. (a) P-C curve. (b) Time variation of the temperature difference between the inlet and outlet of the circulating water.

ることが分かる。Fig. 2bではノーマル水素とパラ水素の数値解析結果の間にパラ/ノーマル変換熱に伴う若干の温度差がみられるがその差は0.2℃未満で熱電対でこの差を計測することは困難であった。

4. まとめ

液体水素のBOGを水素吸蔵合金タンクに貯蔵する際、BOGをノーマル水素と同様に扱っても実用上問題ないことが実験的に確認できた。

参考文献

1. 榎 浩利 他:第 26 回水素エネルギー協会大会予稿集, (2006) pp.89-92.

謝辞

本研究成果は NEDO が実施する事業の委託契約に基づいた水素貯蔵装置及び水電解・燃料電池一体型セルの研究開発 (H19-21) による支援を受けて得たものである。

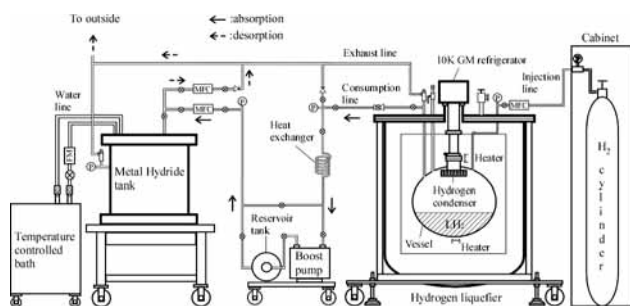


Fig. 1 Experimental set-up.

300kW 陽子ビーム入射時における低温水素システムの動的特性

Dynamic characteristics of the cryogenic hydrogen system for a spallation neutron source at J-PARC for a 300-kW proton beam operation

達本 衡輝, 麻生 智一, 加藤 崇, 大都 起一 (原子力機構)
 TATSUMOTO Hideki, ASO Tomokazu, KATO Takashi, OHTSU Kiichi (JAEA)
 E-mail: tatsumoto.hideki@jaea.go.jp

1. はじめに

J-PARC の核破砕中性子源では、1 MW 級の陽子ビームによる核破砕反応によって発生した高速中性子を超臨界圧水素(1.5 MPa, 20 K)によって冷中中性子に減速させるための低温水素システム(Fig.1)を開発した。2009年11月から120kW陽子ビーム出力の安定運転を実施している。昨年12月に短時間ではあるが、初めての300 kW陽子ビーム運転に成功した。本講演では、300kW陽子ビーム入射時における低温水素システムの動的挙動試験結果について報告する。

2. 圧力制御方法

低温水素システムは、非圧縮性の超臨界圧水素の閉ループを形成する。そのため、ビーム入射・停止時には、モデレータ温度が変動することによって、大きな圧力変動が引き起こされる。本システムでは、この圧力変動を抑制するために、ペロー構造を有するアキュムレータ(容積変動: 15.7L)による水素ループの容積を変動させる方法とモデレータで与えられる熱負荷をヒータ(最大出力: 7kW)により補償する方法を併用した圧力制御システムを考案した。

ビーム停止時は、ビーム熱負荷相当分の熱負荷をヒータにより補償し、ヒータ出口温度を 20.9K に保持するように PID 制御によるヒータ出力制御を行っている。1 MW の陽子ビームが入射されると、モデレータ部では 3.75 kW の核発熱を吸収するために温度が上昇し、それが流速に乗って下流側のヒータ部まで移動する。ヒータ入口で、0.2 K 以上の温度上昇を検知すると、核発熱量相当のヒータ出力を瞬時に降下させる。その後、ヒータ出力は、ヒータ出口温度を陽子ビーム入射前と同じ 20.9 K に保持するように、PID 制御により調整され、熱負荷変動予測値と実際に印加された熱負荷との補正を行う。

一方、アキュムレータは、水素ループの圧力変動に応じて自発的にその容積が変動し、その結果、水素ループの圧力変動が緩和される。

3. 300 kW 陽子ビーム入射時の圧力変動結果

Fig.2 に 302 kW 陽子ビーム入射時における温度、圧力、ヒータ、アキュムレータの挙動を示す。302 kW 陽子ビームが入射されると、水素ループの圧力 (P1) は上昇するため、アキュムレータは収縮した。これらの変動は、ヒータのフィードフォワード制御が開始されるまで継続する。27 秒後、ヒータ入口(T05)で 0.2 K の温度上昇を検知したので、フィードフォワード制御により、陽子ビーム熱負荷に相当する 1013 W のヒータ出力を降下させた。ヒータ出口温度は一時的に 20.85 K まで降下したが、PID 制御により、15 秒以内で初期値まで回復した。それ以降、ヒータ出口温度は一定に制御することができた。302 kW 陽子ビーム入射時の最終的な圧力上昇は 12 kPa、アキュムレータ収縮量は 3.16 mm (0.55L に相当) であった。

このように、ステップ状熱負荷が水素ループ内に与えられても、フィードフォワード制御とフィードバック制御を併用したヒータ制御により、ヒータ下流域における温度変動が抑制され、その結果、ビーム入射直後の過渡的な圧力変動はなく、短時間で安定した状態を得ることを確認できた。

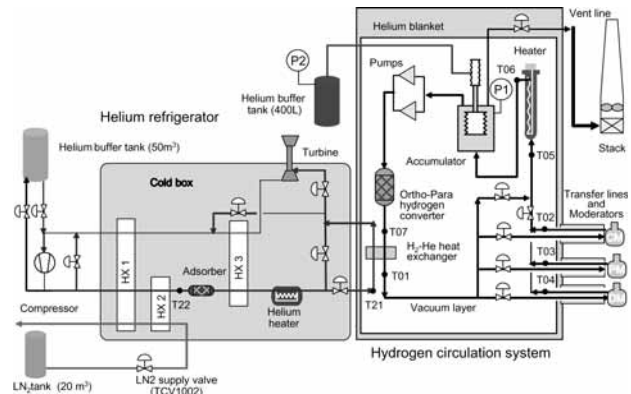


Fig.1 Overview of the cryogenic hydrogen system

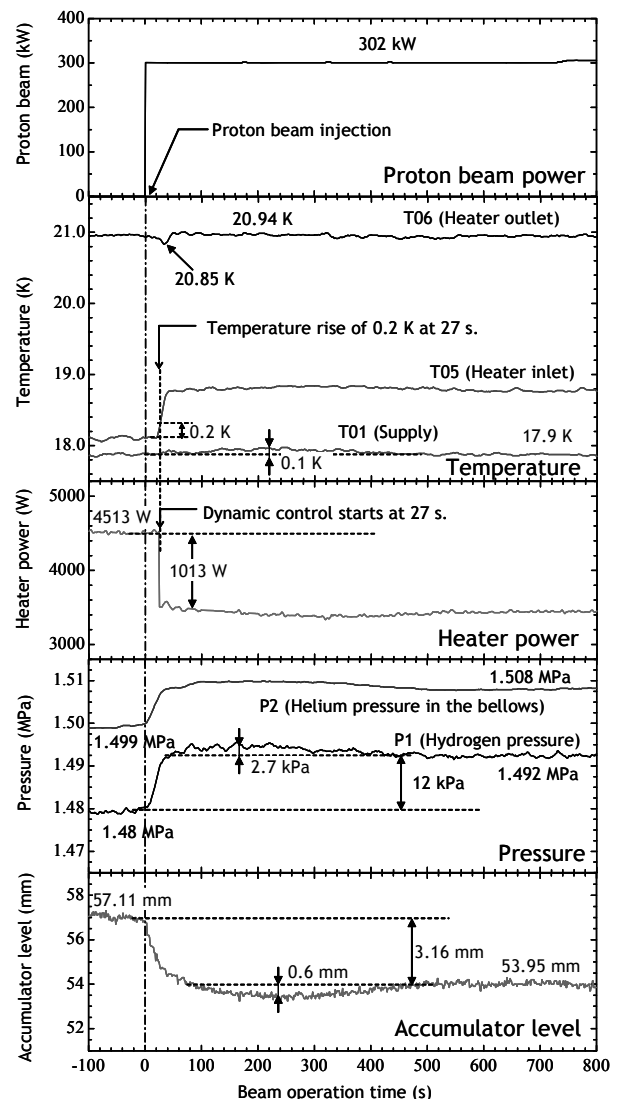


Fig.2 Cool-down process of the cryogenic hydrogen system.

回転下高感度ねじり振子実験と固体 He 超流動と 量子渦糸観測用 ISSP クライオスタット ISSP Rotating Cryostat for Torsional Oscillator Study of the Supersolid state and the Vortex State of Solid He

北村 玲(新潟大); 八木 雅彦(東大); ロガツキー クリストフ(Institute of Low Temperature & Structural Research); 久保田 実(東大)
KITAMURA Akira(Niigata Univ.); YAGI Masahiko(Univ. Tokyo); ROGACKI Krzysztof (ILTSR); KUBOTA Minoru(Univ. Tokyo)
E-mail: kubota@issp.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

固体状態で而も同時に超流動性を示す「超流動固体状態」は1960年代後半から1970年までに、理論的に「必ず存在する」と予言されて来た。しかしその後40年間様々な国のグループが実験的に見出そうと競って来たが、長年見付からずに来た。状況が一転したのは、2004年1月号のNature誌の記事(E. Kim & M. H. W. Chan, NATURE |VOL 427 | 15 JAN 2004 | www.nature.com/nature, P.225; Probable observation of a supersolid helium phase) 以降である。実はその後も現在に至るまで、固体超流動現象及びそれに関連した現象は、未だ解明されて居らず、様々な新しい実験が試みられている。我々はその中で、hcp固体Heの渦糸状態を議論し(Phys. Rev.Lett. Vol.101, 065301 (2008); J Low Temp Phys (2010) 158: 572-577)、更に渦糸状態から超流動固体状態への転移(arXiv:0903.1326)を観測している。また、超流動固体状態で回転下での渦糸の侵入を観測しつつある。本講演は、回転下でも振動のない条件下でいかにしてこれらの観測が可能になったか、と我々のより低温度での実験に着いて低温工学的研究成果を報告する。

2. 滑らかな回転と無振動状態の実現の必要

固体ヘリウムの捻り振り子応答は、当初より大変微少な $10 \mu\text{m/s}$ という様な速度場に依って変化する事が知られている^{1,2}。それ故、試料を回転させてそこに量子渦の侵入する事を観測しようとするれば、回転中も振動が全くと言って良い程ない状態を実現する必要がある。因に通常の都会の建物は数ミクロン毎秒程度の振動が常にある。そこで、我々が考案したのが、クライオスタット自体に固有振動数が1ヘルツ程度の捻り振子の要素を持たせ、それよりも高速の振動は伝わらない様に工夫した。

3. ISSP 回転クライオスタットの構造

Fig. 2 にその構造を示した。即ち、実験装置(捻り振子)を組み込んだ低温装置は Dewar 内の希釈冷凍機に取り付けられている。この Dewar は2つの超高精度空気ベアリングで支えられて居り、水平面内で自由に回転出来る。このクライオスタットは、ゴム製の soft coupling に依って上部の駆動及び計測器回転テーブルを支持する構造に繋がっている。この soft coupling は同時に希釈冷凍機の循環するヘリウム3の減圧配管の一部にもなっている。Fig. 1 の写真は、下部フレームと Dewar を示す。

4. 世界初の固体ヘリウム中の渦糸観測

この装置を用い我々は、固体ヘリウムの固体超流動状態で、回転数に比例するエネルギー散逸の増加を観測した¹。固体の超流動の物理は未だ全容は全く定まって居らず、論争が絶えないが、我々は確実に量子渦の物理を研究して居ると考えている。基礎科学の進展は、新しい技術で新しい実験実を見出す事によって進展すると信じて止まない。ご支援をお願いします。尚、この結果は、J. Low Temp. Phys. に掲載予定です。



Fig.1 ISSP fast rotating cryostat lower frame with Dewar: view from upper space.

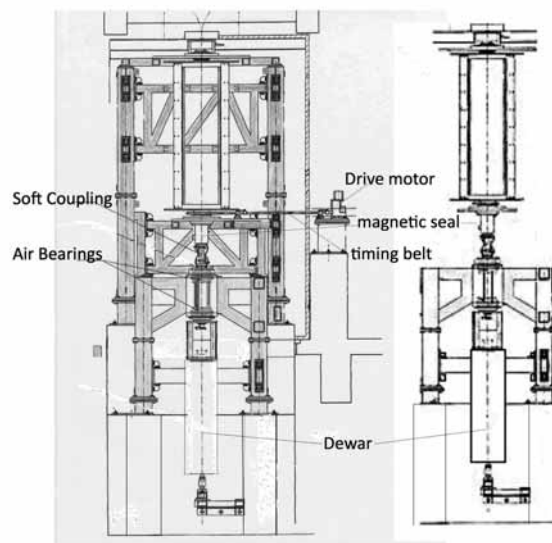


Fig. 2 Double structure scheme of the ISSP rotating cryostat. The outer structure holding the rotating table on which measuring electronics are mounted is colored brown (picture on the left) and fixed firmly to the basement. The lower structure supports the rotating cryostat by two high precision air bearings through which a stable shaft is mounted. The upper structure and the lower cryostat are joined by a soft coupling which also functions as the ^3He pumping line for the dilution refrigerator. The figure on the right shows the rotating parts and the lower portion. The upper part is driven through a timing belt by a precision AC motor located outside of the shielded room surrounding the whole apparatus. One can see a device for the centering of the Dewar at the bottom to help the initial setting of the Dewar. Final detailed adjustments were made more than 6 months after completion of the whole set up to allow for the initial settling of the 10 metric ton structure.

参考文献

1. M. Yagi, A. Kitamura, N. Shimizu, Y. Yasuta, M. Kubota, to be published J. Low Temp. Phys. (JOLT-511)
2. ibid. (JOLT-475).