

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540312

研究課題名(和文) 2相CO₂を用いた先端的測定器冷却システムの開発研究課題名(英文) Development of a cooling system using 2-phase CO₂ for advanced detectors

研究代表者

杉本 康博 (SUGIMOTO, Yasuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：70196757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子・原子核実験に用いられる最先端測定器を冷却するための、2相CO₂を冷媒として用いた測定器冷却システムの開発研究を行った。2相CO₂というのは気相と液相のCO₂が共存する状態で、CO₂の大きな潜熱によって冷却を実現するものである。これまで他のグループによって開発された2相CO₂冷却システムではCO₂を循環させるのに液相ポンプが用いられたのに対し、われわれはより安価に実現できる、ガスコンプレッサーを用いたシステムを開発し、それを用いて -40 から +15 の範囲で測定器を冷却できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a detector cooling system using 2-phase CO₂ as the coolant aiming at applications to state-of-the-art detectors for nuclear and particle physics experiments. In the 2-phase CO₂, gas phase and liquid phase CO₂ co-exist, and the large latent heat of CO₂ is used for cooling. So far, 2-phase CO₂ cooling system developed by other groups adopted liquid pumps for circulation of CO₂. On the other hand, the cooling system we have developed adopts a gas compressor, which enables constructing the cooling system with much less cost. Using this cooling system, we have demonstrated the capability of cooling detectors between -40 °C and +15 °C.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：粒子測定技術 2相CO₂ 冷却器

1. 研究開始当初の背景

最近の高エネルギー物理学の実験に用いられる測定器においては、その性能向上に伴って消費電力密度が高くなる傾向がある。一方で荷電粒子の多重散乱による分解能の低下を抑えるために測定器の低物質量化も求められる。これらの課題に対応するため、効率的で低物質量の測定器冷却システムの重要性が増している。そのような冷却システムとして、2相 CO₂ を冷媒として用いた冷却システムが最近注目を集めている。

液体と気体が共存する2相流体を用いた冷却システムは液体が気体に変わる際の大きな気化熱を利用するもので、水冷などに比べて流量ははるかに少なく済む。また、流入熱は相変化にのみ使われるため、配管に沿ってどこでも温度がほぼ一定の冷却ができる。これまで2相流体による高エネルギー物理学実験のための測定器の冷却システムによく用いられてきた C3F8 などのようなパーフルオロカーボン(PFC)に比べて CO₂ は約3倍の潜熱を持っており、必要な流量がさらに少なくなる。また、使用圧力が高いため、蒸発した気体の体積が小さく、さらに粘性も PFC の約半分である。これらの特徴のため、2相 CO₂ では同じ冷却性能を得るのに必要な配管の径が PFC に比べて細くでき、パイプと冷媒を合わせた物質も少なくなる利点がある。

我々は先端的測定器の冷却に用いるため、このような優れた特徴を持った2相 CO₂ を用いた冷却システムのR&Dを開始した。

2. 研究の目的

我々は2相 CO₂ を冷媒として用いて、測定器を零下40℃以下から常温付近の温度までの範囲で冷却できるシステムの開発を目的とした。

これまで2相 CO₂ を用いた冷却システムの開発は海外の研究機関で行われてきた。しかしそれらのR&Dでは零下40℃以下の冷却は達成されておらず、また、2相 CO₂ を循環させるのに液送ポンプを用い、CO₂ の再液化はフロンを用いた別の冷凍機を用いて冷却対象の測定器の冷却温度よりも低い温度で行っていた。そのためコストが比較的高くなるという一面があった。また、冷却システムから測定器までの長い距離を低温の状態に維持しなければならず、熱流入を防ぐために厳重な断熱が必要であった。我々はそれらの方法とは異なり、ガスコンプレッサーによって CO₂ ガスを圧縮し、それを常温に近い温度の冷却水を用いた凝縮器で液化させるという方法を選んだ。この方法では液化 CO₂ は常温付近の温度で輸送され、測定器のすぐそば(あるいは測定器内部)に置かれた熱交換器で冷却される。

開発の第一段階では一体型の冷却システムを開発するが、実際の高エネルギー物理学の実験では液化器の部分に冷却対象の測定

器から離して使うことが想定される。そのため、開発の第2段階では、液化器と冷却器(熱交換器)の部分に20m以上離れたシステムを開発する。

3. 研究の方法

ガスコンプレッサーを用いた2相 CO₂ 冷却システムの開発を以下の手順で進めた：

- (1) 低温の CO₂ に潤滑油が混入しないオイルフリーのガスコンプレッサーシステムの開発
- (2) そのコンプレッサーシステムを用いた冷却システムの詳細設計と製作
- (3) 冷却システム完成後、動作条件の最適化
- (4) 液化器と測定器の間を長くしたシステムの設計・製作
- (5) 長期間の運転を通じた冷却システムの安定性の確認

4. 研究成果

(1) オイルフリーガスコンプレッサー

研究の当初は高性能フィルターを用いてオイルフリーのガスコンプレッサーシステムを構築しようと考えていたが、各社の製品を調べていくうち、ガスブースターと呼ばれるコンプレッサーを使えば特別なオイルフリーがなくても圧縮ガスに潤滑油等の汚染が起きないことが分かった。ガスブースターは圧縮空気で駆動されるレシプロ式のコンプレッサーで、駆動に用いられた後の圧縮空気は膨張して温度が下がり、コンプレッサーのシリンダーの冷却に用いられる。そのため、オイルを用いなくてもコンプレッサーおよび圧縮ガスの温度上昇をある程度抑えることができる。

我々が使用したガスブースターはハスケル社製の AGD-7 という製品で、図1のような構造を持つ。大きな面積を持つ駆動エア側ピストンに小さな面積のガス圧縮用ピストンが直結されており、ピストンの面積比に応じた加圧ができる。AGD-7 の場合、ピストンの面積比は7で、駆動エアの圧力を P_A 、吸入ガス圧力を P_S とすると吐出ガスの最高到達圧力 P_O は $P_O < 7P_A + P_S$ となる。

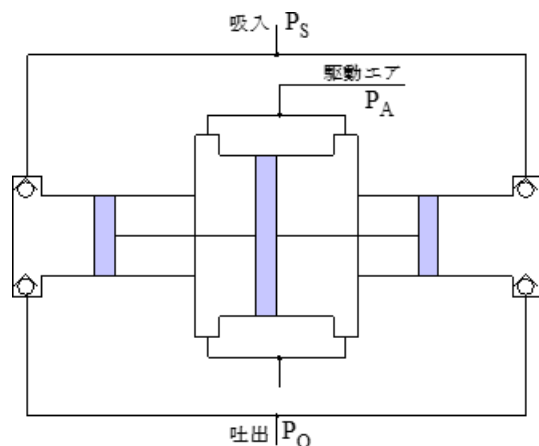


図1. ガスブースターの模式図。

(2) システムの設計・製作

ガスブースターを用いた2相CO₂冷却システム概念図を図2に示す。実際の装置には図には示されていない圧力計や温度センサーが各所に配置されており、それらの測定値は40チャンネル入力のデータロガーで記録された。

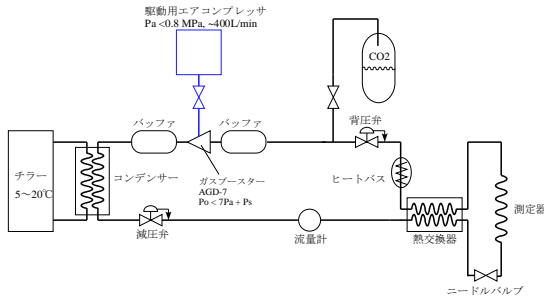


図2. 2相CO₂冷却システム概念図

ガスブースターで圧縮されたCO₂はコンデンサーで冷却水によって冷やされて液化する。ガスブースターがレシプロ式であるため圧力の脈動を生じるが、それはガスブースターの直前と直後に設置されたバッファと、コンデンサーの下流の減圧弁で緩和される。液化CO₂は熱交換器で戻りの低温のCO₂によって冷却され、ニードルバルブで減圧される。図2の右端の測定器を通る冷却パイプ内部の圧力はその下流にある背圧弁で設定され、その圧力が飽和蒸気圧となる温度にコントロールされる。圧力を1MPaに設定すると温度は-40°Cになり、5MPaに設定すると温度は15°Cになる。液化CO₂の冷却は熱交換器で還りのCO₂が気化することで実現されるのであって、ニードルバルブでの減圧の際のジュール・トムソン効果によるものではない。測定器から流入した熱は2相CO₂の気化に使われるため、CO₂の温度は変化しない。測定器および熱交換器からの熱流入によってある程度気化したCO₂は温水に浸かった配管を通ることで完全に気化され、背圧弁を経由してガスブースターに戻る。実際に製作したシステムの外観を図3に示す。

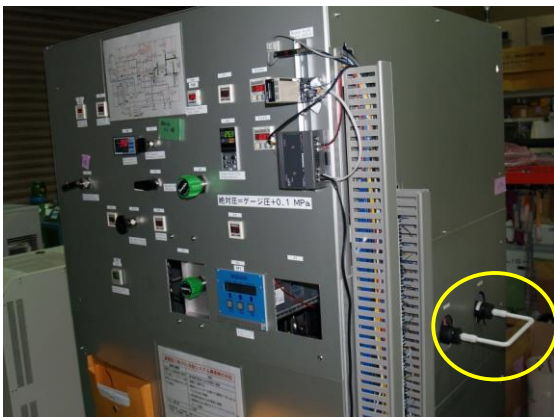


図3. 完成した冷却システム。黄色い楕円で囲われた部分が-40°Cに冷却され霜が付いている。

(3) 動作条件最適化

組み上がったシステムを実際に運転して、充填すべきCO₂の量、ガスブースターの吸入圧等の最適化を行った結果、実際に-40°Cから+15°Cの間での冷却運転に成功した。冷却温度の設定を変える際にはCO₂の充填量を変える必要があることが明らかになった。また、システムの冷却能力は-40°Cの時はガスブースターを駆動するエアコンプレッサの能力が、+15°Cの時はニードルバルブの流量計数が決めていることが分かった。特に低温においてはエアコンプレッサの圧力不足のため、駆動エアの流路切り替え部分がうまく動作せず、駆動エアのかなりの部分がガスコンプレッサの駆動に使われないままに排気されてしまうような現象が見られた。これまでは3.7kW、410L/minのエアコンプレッサを使っていたが、今後、エアコンプレッサの増強が必要と思われる。

(4) 長距離液送

実際の高エネルギー物理学の実験においてはCO₂の液化を行う部分を測定器から離れた場所に設置し、冷却を行う熱交換器は軽量化して測定器内部に組み込むことになると思われる。そのような液化部と冷却部とが離れたシステムへの改造を行った(図4、5)。図2の流量計の部分に流量計ユニットとして、熱交換器、ニードルバルブ、測定器(負荷)、ヒートバス(ヒーター)を含む部分を冷却ユニットとして、独立した筐体に組み込んだ。液化部と冷却部の間は長さ20mのフレキシブルホースでつながれる。改造直後に次項に述べるようなガスブースターの問題が生じたため、改造後の動作確認は今後の課題として残された。

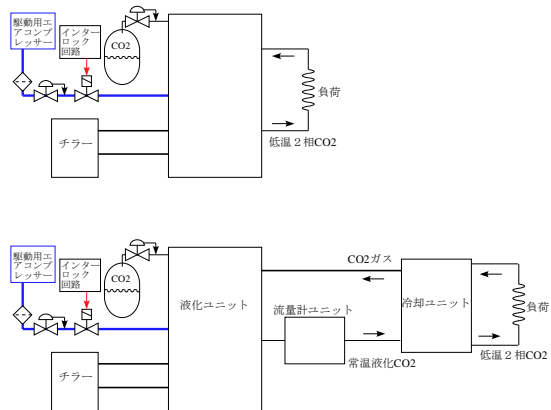


図4. 液化部と冷却部の分離。上図が改造前、下図が改造後の模式図。



図5. 改造後の液化ユニット(左)、流量計ユニット(右側ラック中ほど)、および冷却ユニット(右側ラック下)。

(5) システムの安定性

システム改造後の気密検査において、ガスブラスターのピストン用 O リングに CO₂ ガスの漏れが見つかった。改造時にもシステムに使用されている一部のバルブに使用されている O リング(バイトン製)に劣化が見つかり交換を行っている。これらはどちらも CO₂ を高圧から急激に減圧した際に起こるブリスターと呼ばれる現象と考えられる。O リングを高圧で使用していると、CO₂ の分子が徐々に O リング内部に浸透し、それが急減圧した際に膨張して O リングを内部から破壊する現象である。長期間にわたり、加圧と減圧を繰り返したために、このような現象が起こったと思われる。

ブリスター現象を起こさない材質の O リングは高価ではあるが知られており(カルレッツ、ケムラッツ等)、ガスブラスターに使われている O リングをカルレッツ製の物に交換する作業を進めている。

(6) 研究成果のインパクトと今後の展望

本研究によって、ガスブラスターをコンプレッサーとして用いた 2 相 CO₂ 冷却システムが -40℃ から +15℃ の範囲での測定器冷却に使えることの原理実証ができた。これにより、比較的安価に 2 相 CO₂ 冷却を実現できる見通しが立った。

実用化に向けては、今後、以下の項目に関する開発研究を継続する必要がある：

- ① 急減圧に耐えられる O リングの研究
すでに述べたように、急減圧に耐えられる O リングの材質は知られており、これらを実際に試験して、耐久性が確認されれば交換する。
- ② ガスブラスター駆動用空圧系の最適化
エアコンプレッサーを増強すると共に、配管を見直して圧力損失を極力小さくする。
- ③ 遠隔操作を可能にする
今回、製作した試作機はバルブ操作等がすべて手動である。これをパソコンからの遠隔操作を可能にする。
- ④ 熱交換器の低物質質量化

2 重管あるいは接触する 2 本のパイプによる低物質質量熱交換器を開発することによって、熱交換器を測定器内部に配置できるようにする。

- ⑤ 装置の小型化
今回の試作機は幅×奥行×高さが 1m×1m×2m 程度もある。今後、本体の機能を液化器だけにすることもあり、サイズを大幅に小型化することを目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Ties Behnke, Yasuhiro Sugimoto, et al. (9 人中 7 番目), “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors”, e-Print:arXiv:1306.6329[physics.ins-det] (2013), 査読無し、<http://arxiv.org/abs/arXiv:1306.6329>

[学会発表] (計 3 件)

- ① Yasuhiro Sugimoto, “R&D Status for FPCCD”, ILD meeting 2014, 2014/9/8, 水沢グランドホテル(岩手県奥州市)
- ② Yasuhiro Sugimoto, “R&D status of FPCCD and its cooling system”, European Linear Collider Workshop ECFA LC2013, 2013/5/28, ハンブルグ(ドイツ)
- ③ Yasuhiro Sugimoto, “CO₂ cooling for FPCCD Vertex Detector”, KILC2012, 2012/4/24, 大邱(韓国)

[その他]

ホームページ等

<http://rd.kek.jp/project/co2/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 康博 (SUGIMOTO, Yasuhiro)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師
研究者番号：70196757

(2) 連携研究者

春山 富義 (HARUYAMA, Tomiyoshi)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授
研究者番号：90181031

藤井 恵介 (FUJII, Keisuke)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：30181308

坪山 透 (TSUBOYAMA, Tohru)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・講師
研究者番号：8018622

笠見 勝祐 (KASAMI, Katuyuu)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・技師
研究者番号：50391727

房安 貴弘 (FUSAYASU, Takahiro)
佐賀大学・理工学部・准教授
研究者番号：70399210