

令和元年6月6日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03992

研究課題名(和文)最先端測定器に応用可能な2相CO₂冷却システムの実現研究課題名(英文)Realization of 2-phase CO₂ cooling system applicable to 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) 5,400,000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実用化に向けた開発研究を行った。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。高圧のCO₂環境下に特有のOリングの劣化や冷却温度の不安定性などの様々な課題を解決するためのR&Dを行い、十分実用に耐えうる-40 から+15の範囲で測定器を安定して冷却できる冷却システムの試作機を完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって開発された2相CO₂冷却システムは先端的な素粒子・原子核実験に用いられる測定器の冷却に幅広く応用可能なものであり、これらの分野の実験的研究に貢献できる。他のR&Dグループで採用された方式に比べてコストを抑えられるため、応用範囲は広いと思われる。また、CO₂はフロンに比べて地球温暖化係数がはるかに小さいため、測定器冷却以外にも、フロンを用いた冷却システムの代替品としての応用の可能性もある。

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. We have conducted the R&D in order to solve the challenges such as degradation of O-rings, which could happen under environment of high pressure CO₂, and instability of cooling temperature. By solving these issues, we have succeeded to construct a prototype of the cooling system which can cool detectors stably 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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子・原子核の実験に用いられる測定器（読み出し回路を含む）の冷却方式は、かつては空冷や水冷が主流であった。しかし物理学の最先端に挑む近年の実験においては膨大な測定データが必要となり、高密度・多チャンネル化、高速化、測定器内部での信号のデジタイズなどの性能の向上が求められ、その結果、消費電力密度が増大する傾向がある。一方で荷電粒子の多重散乱の影響を抑えるために測定器の低物質量化も同時に求められる。また、半導体検出器の放射線耐性向上のため、氷点下の冷却も要求される。空冷や水冷ではこれらの課題に対処できず、新たな効率的な測定器冷却システムが要求されるようになった。そのような測定器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注目を集めている。

気液混合の2相流体による冷却システムでは液体が蒸発する際の大きな気化熱を利用するため、必要な冷媒の流量が水冷に比べてはるかに少ない。また、流入熱は冷媒の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な冷却ができる。これまでアトラス実験などで広く用いられた冷媒はC3F8などのパーフルオロカーボン(PFC)であるが、PFCに比較してCO₂は以下のようなさらに優れた特徴を持っている：

- ・ 約3倍の潜熱(-40°Cにおいて0.32kJ/g)を持っており、流量がさらに少なく済む
- ・ 2相CO₂は高い圧力(-40°Cで1MPa、+15°Cで5MPa)で使用するため、蒸気の体積が小さく、かつ配管に沿っての圧力低下に対する温度変化の割合が小さい
- ・ 粘性がC3F8の約半分

これらの特徴のために、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より細くでき(C3F8の半分以下)、パイプと冷媒を合わせた物質質量も少なくなる利点がある。

本研究に先行し、平成24年度から3年間、科研費(基盤研究(C))を用いて、循環型の2相CO₂冷却システムの開発を行った。我々の開発したシステムは、液化CO₂を液送ポンプで循環させる海外のグループの方式とは異なり、圧縮空気駆動のガスコンプレッサーを用いてCO₂の循環を実現する。液送ポンプ式ではCO₂の液化は低温で行われるのに対し、我々の方式ではCO₂の液化は常温付近で行われ、その液化CO₂を測定器の近傍まで輸送して冷却対象の測定器の直前で熱交換器とニードルバルブを用いて温度を下げる(図1参照)。そのため液送ポンプ式で必要となる高価な低温チラーや配管への厳重な断熱加工などが不要となる。これまでの開発研究の結果、我々独自のガスコンプレッサー式システムでも-40°C以下から常温付近までの温度範囲での冷却ができることを実証した。冷却能力は-40°Cで約150W、+15°Cで約1kWを達成した(3.7kWの駆動用エアコンプレッサーを使用した場合)。一方、これまでの研究により、以下のような課題が明らかになった。

- ・ 冷却温度の設定が流量の変化などによって微妙に変動し、安定性に欠ける
- ・ 設定冷却温度を変えるたびにCO₂を抜いたり追加したり、充填量の調整が必要
- ・ 熱交換器が測定器内部に置くには大きすぎ、かつ重すぎる
- ・ 長期にわたり加減圧を繰り返すと使用しているOリングが劣化する

これらの課題を解決し、実際の素粒子・原子核実験に応用できる実用的な2相CO₂冷却システムを開発するために、本研究を実施することとなった。

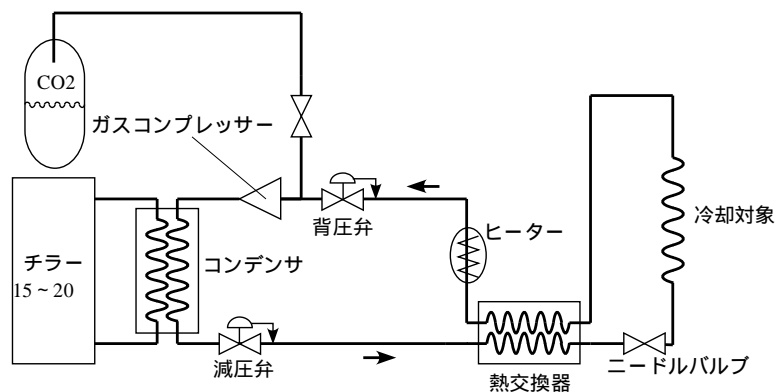


図1. 開発を行った冷却システムの原理図。

2. 研究の目的

本研究においては前述の4つの課題を解決するために、冷却温度を一定に保つための圧力制御、液化CO₂リザーバーとその貯液量制御、配管の一部を利用した低物質質量熱交換器、CO₂ガスの加減圧の繰り返しに耐えられるOリングの材質の4点についての基礎的な開発研究を行うことを目的とした。さらに、それぞれの開発が完了後、これらの成果を取り入れた、長期間の運転が可能な、実用に耐える冷却システムの試作機を製作することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 圧力制御技術の開発：2相CO₂冷却システムの冷却温度の制御は2相CO₂の圧力を制御することによって行われる。これまでは機械的なスプリングロード式背圧弁で制御していたため、流量によって圧力が多少変化してしまうという問題があった。これを圧力センサーと連続的な

流量調節のできる電磁弁を組み合わせることで、流量によらず一定の圧力制御ができるようにするシステムの開発を行った

(2) 低物質量熱交換器の開発：これまで常温の液化 CO₂ の温度を目的とする冷却温度まで下げるのに用いてきたプレート式熱交換器は実際に必要な熱交換能力を大きく超えたオーバースペックの物で、サイズと物質量の点で測定器内部に入れられない。そこで、プレート式熱交換器の代わりに、配管の一部を2重管にした、あるいは2本のパイプを接触させただけの軽量・コンパクトな熱交換器にすることによって、熱交換器を測定器の内部に設置できるようにする。この軽量化熱交換器においては、冷却対象に向かうパイプを細くすることによって図1のニードルバルブの役割も同時に担わせる。

(3) Oリングの耐性試験：これまでに開発したシステムをある程度長期間運転した後にシステムに使われているバルブを分解してみると、エラストマ製のOリングが激しく劣化しているものが見つかった。これは、高圧のCO₂がOリングの内部に浸透し、急速に減圧した際にOリング内部でCO₂がガス化・膨張し、Oリングを内部から破壊したものと考えられる。この現象はExplosive Decompression (ED)と呼ばれている。実際の2相CO₂冷却システムの状況により近い、7MPaまで加圧できるテスト装置を製作し、各種のOリングの耐性試験を行って、このような劣化の生じないOリングの材質を明らかにする。

(4) リザーバシステムの開発：当初は冷却温度の変更の際にCO₂の充填・排気をしなくてもよいようにと考えてリザーバシステムの開発を始めたが、開発途中で目的を変更し、システムからのCO₂のリークがあっても正常動作を長く続けられるようにするためのリザーバシステムの開発を行った。

(5) 冷却システム試作：これまでの各要素の技術開発の成果を取り入れた冷却システムの試作機を新たに製作する。

4. 研究成果

(1) 圧力制御技術の開発：これまで用いてきた手動による背圧弁のかわりに圧力センサーと電磁弁を組み合わせたシステムに置き換えた。このシステムではコントローラーの設定値を変えることで背圧を10秒以内に安定した値に設定することができるようになった。

(2) 低物質量熱交換器：2重管式熱交換器を試作して、その性能を測定した。まず、2重管の内側に入る細管の圧力損失を、内径1.0mmの場合と0.5mmの場合について測定した。図2に示すように、測定結果は液化CO₂の粘性を0.0001Pa・s、管の壁面粗さを0.0015mmと仮定して計算した値とほぼ一致した。細管にニードルバルブの代わりにさせる場合には、計算に必要な長さや内径を決めればよいことが分かった。

次に、図3に概念図を示すような2重管式熱交換器を製作し、実際の熱交換能力を測定した。2重管の内層は外径1/16インチ、外層は外径3/8インチのステンレス管である。また、熱交換部の長さは40cmある。内層の外側に-18.4℃の2相CO₂を流し、内層に22.8℃の液化CO₂を1.0g/sの流量で入れた場合、出口では-10℃まで液化CO₂の温度が下がった。

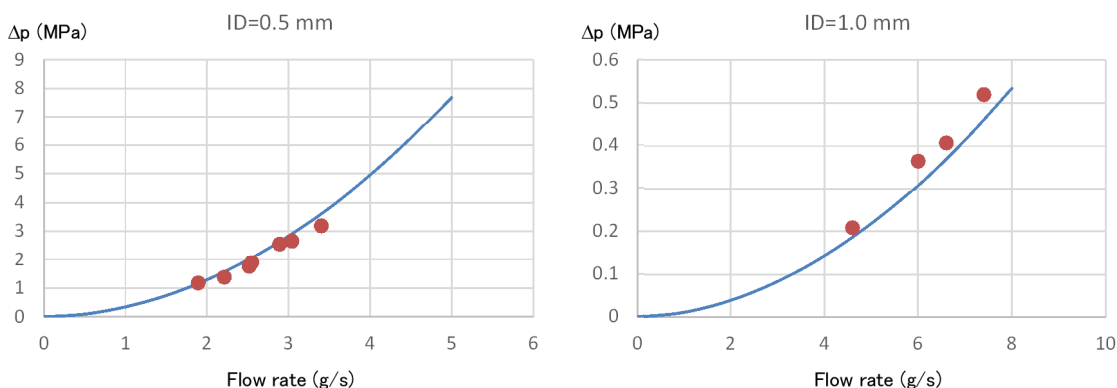


図2. 流量の関数としての液化CO₂の圧力損失。管の長さは40cm、内径は左図が1.0mm、右図が0.5mmの場合。曲線は液化CO₂の粘性を0.0001Pa・s、管の壁面粗さを0.0015mmと仮定して計算した値。

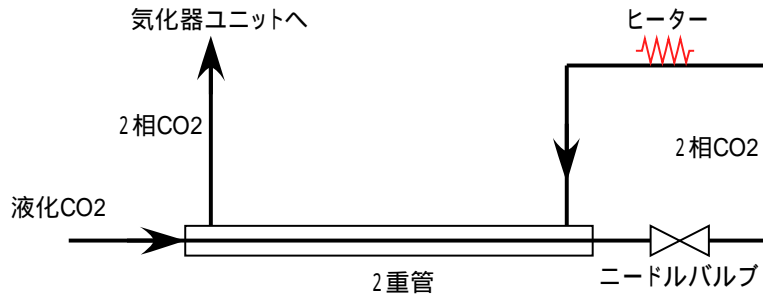


図3 . 2重管式熱交換器の模式図。

(3) Oリングの耐圧試験：7 MPaまで加圧のできるOリング試験装置を製作し、約1週間にわたって加圧24時間、減圧(大気圧)1時間を繰り返す試験を行った。加圧の際には温度を50℃まで上げて試験を行った。Oリングの材質としては、ブナ、バイトン、ケムラツツ、カルレッツの4種類を、硬度は70のものとの90のものを試験した。加減圧を繰り返した後、カッターでOリングを切断し、その断面を観察して損傷の有無を確かめた。その結果、材質による差は見られなかったが、硬度70のものには大部分には損傷が見られ、硬度90のものには損傷が見られなかった。この結果を踏まえ、今後、ガスプースターのオーバーホール時には硬度90のブナ製のOリングを用いることにした。また、安全弁にもOリングが使われていたが、次回の試作からはOリングを使わない、メタルシールの安全弁を使うこととした。

(4) リザーバシステムの開発：ガスプースターに使用されているOリングを硬度90のものに交換した後も、ガスプースターからの非常にゆっくりとしたガスのリークが見られた。システムから少々ガスのリークがあっても冷却システムとして正常な動作がより長く続けられるよう、リザーバシステムの開発を行った。開発したリザーバシステムは、CO2の凝縮器の直後に1Lの容積を持った縦長のタンクを設置し、その最上部を約30℃になるようにヒーターで制御し、凝縮直後の液化CO2の温度(15～20℃)となる最下部との間に温度勾配を持たせるようになっている(図4)。何らかの理由で液化CO2の圧力が下がった場合、その圧力に対応する温度(沸点)となる位置までリザーバ内の液面が下がり、その分、リザーバ内にあった液化CO2が循環回路に流れ込み、それによって圧力の低下が緩和され、運転の安定性が向上する。このシステムの試験結果から、このリザーバシステムを用いれば冷却システムからの約150LのCO2ガスの排気に相当する圧力低下にも対応できることが分かった。

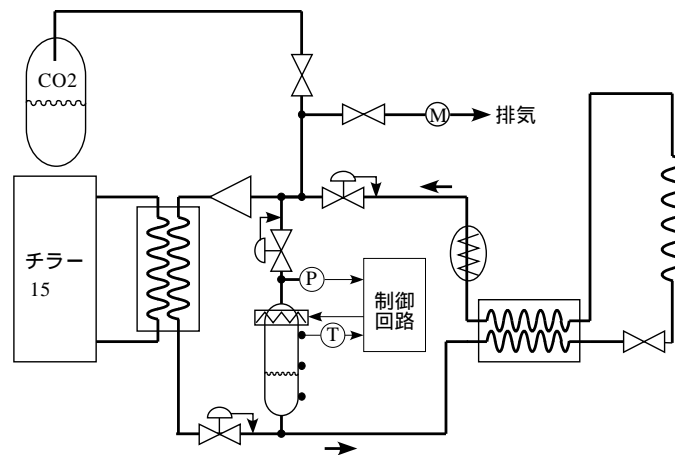


図4 . リザーバシステムを追加した冷却システムの概念図。

(5) 冷却システム試作：以上に述べた開発研究の結果、実用に耐えうる冷却システムの製作のめどが立った。上記の開発結果をすべて取り入れた新たな試作機を製作した。同時に、この試作機では、ガスプースターが出す騒音の軽減と、装置の小型化を図った。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

Yasuhiro Sugimoto, Keisuke Fujii, Takahiro Fusayasu, Katsuyu Kasami, and Tohru Tsuboyama, “ R&D status of a gas-compressor based two-phase CO₂ cooling system for FPCCD Vertex Detector ”, e-Print:arXiv:1703.03138[physics.ins-det] (2017), 査読なし、<https://arxiv.org/pdf/1703.03138.pdf>

〔学会発表〕(計 1件)

Yasuhiro Sugimoto, “ R&D status of a gas-compressor based two-phase CO₂ cooling system for FPCCD Vertex Detector ”, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), 2016/12/6, 岩手県盛岡市

〔その他〕

ホームページ等

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

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：藤井 恵介

ローマ字氏名：(FUJII, Keisuke)

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名：素粒子原子核研究所

職名：教授

研究者番号(8桁): 30181308

研究協力者氏名：坪山 透

ローマ字氏名：(TSUBOYAMA, Tohru)

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名：素粒子原子核研究所

職名：講師

研究者番号(8桁): 80188622

研究協力者氏名：笠見 勝祐

ローマ字氏名：(KASAMI, Katsuyu)

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名：素粒子原子核研究所

職名：技師

研究者番号(8桁): 50391727

研究協力者氏名：房安 貴弘

ローマ字氏名：(FUSAYASU, Takahiro)

所属研究機関名：佐賀大学

部局名：理工学部

職名：准教授

研究者番号(8桁): 70399210

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。