

Belle II 実験における Vertex 検出器用 二酸化炭素冷却装置の開発と運用

SATテクノロジー・ショーケース2020

■ はじめに

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) においては、現在 SuperKEKB 加速器を使用した Belle II 国際協力実験を遂行中である。この素粒子物理学実験の目的は、高統計の電子陽電子衝突データから標準モデルを超えた物理を探求することにある。

この実験においては、電子陽電子衝突点を取り囲むように最内層として Vertex 検出器 (VXD) が設置されており、物理現象の理解のために重要な役割を果たしている。VXD は閉鎖的な環境に置かれているため、そこに発生する熱を安全にかつ速やかに取り去ることは、実験において重要な要素である。

素粒子物理学実験においては、検出器内部の冷却に関して厳しい制約が課せられている。検出器内部において冷却装置は物質量を可能な限り減らさなくてはならない。実際、冷媒が流れる空間は非常に限られている。また冷却装置は検出器内部において、局所的な温度差がなく、かつ時間的に温度の変動がないように、全体を一定の温度に保たなくてはならない。

このような厳しい条件に合うものとして、気液二相二酸化炭素冷却装置 (IBBelle) が開発された。

■ 活動内容

1. 国際協力

Belle II 実験は国際協力実験であるため、IBBelle 本体はドイツで製作された。しかし、使用場所が日本であるため、高圧ガス保安法が適用される。このためデザイン段階から高圧ガス保安法に基づいた開発が行われた。

2. 高圧ガス保安法の適用

IBBelle は二つの独立した系から構成されている。一つは、二酸化炭素を冷却するためのフロン冷凍機の系である。そして、こちらが本体であるのだが冷却された二酸化炭素を送液ポンプで循環する系である。圧力が 1MPa を超える高圧ガス設備であるので、茨城県庁と以下の手順を踏んで確認を行った。

● 冷凍則の適用

高圧ガス保安法の中では冷凍則が適用されることを確認した。

● 届出を必要とする冷凍能力以下

冷凍則においては、不活性なフロンおよび二酸化炭素に関しては、20 冷凍トン以上 50 冷凍トン未満の施設に関し

ては届出が必要となる。IBBelle においては、20 冷凍トン未満であり届出が不要なことを確認した。

● 自主基準の適用

高エネルギー加速器研究機構の安全自主基準として、届出が必要な施設と同等な設計基準、検査を行うことにした。このため、二酸化炭素の圧力容器に関して、設計圧力は 8.3MPa とし、また室温で液体が全て気化してもこの圧力を超えないように、二酸化炭素量を制限して充填することとした。

3. 設置及び運用

IBBelle 本体は、2016 年 10 月より高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパスの筑波実験棟地下 1 階に設置され (図 1)、実験ホール内の Belle II 実験装置まで真空断熱二重配管で接続された。試験運転を経て、2018 年 3 月からは実際に衝突点近傍に設置された VXD の冷却を行っている。夏季および年末年始のシャットダウン時には、必要なメンテナンスが加えられている。

■ 関連情報等 (特許関係、施設)

現在 IBBelle は、高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス筑波実験棟に設置され、低温運転中である。Belle II 実験は現在遂行中である。

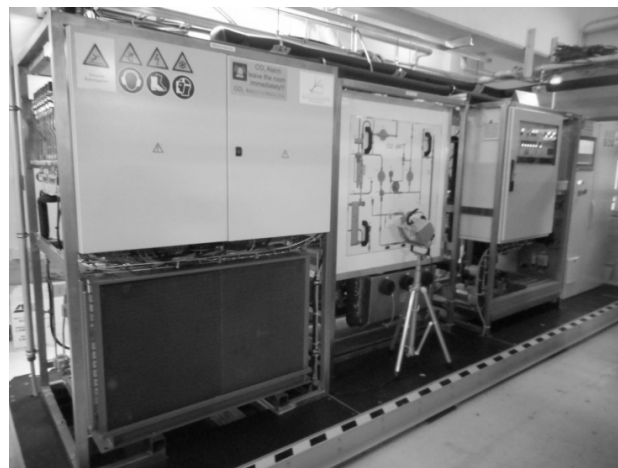


図 1. IBBelle 本体 (筑波実験棟地下 1 階)

代表発表者 川井 正徳 (かわい まさのり)

所属 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

問合せ先 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

TEL: 029-879-6239 FAX: 029-879-6235

オープンイノベーション推進部

加速器科学イノベーション推進室

■ キーワード: (1) 二酸化炭素

(2) 二相冷却

(3) 高圧ガス保安法冷凍則

■ 共同研究者:

青木香苗、高エネルギー加速器研究機構

田中秀治、高エネルギー加速器研究機構

近藤良也、高エネルギー加速器研究機構

坪山 透、高エネルギー加速器研究機構

植田康博、高エネルギー加速器研究機構

H-G. Moser, Max-Planck-Institut für Physik

S. Vogt, Max-Planck-Institut für Physik

U. Leis, Max-Planck-Institut für Physik

■ 二酸化炭素の特徴と要求性能

二酸化炭素は、適度な低温(-20℃)及び比較的高圧(20 bar)な状態で、一定温度一定圧力を保つ気液二相を実現し、また比較的粘度が低いため高圧で狭い配管(直径1.5 mm)を循環させても圧損が少ないことから安定な冷却が可能である。さらに潜熱が比較的大きいことから、少ない流量で大きな熱量を取り去ることが可能で、結果的に物質を減らすことができる。さらに圧力をコントロールすることで気液二相状態の温度を微妙に調整することも可能である。二酸化炭素自体は安定な無機化合物で、安価であることも重要な要素である。このようなメリットのため冷媒として二酸化炭素が選択された。

IBBelleに要求された冷却性能は、VXDの最大熱負荷1100 Wを上回ることであり、実際のIBBelleの性能は、-30℃の冷却温度で約3 kW以上を達成している。

■ IBBelleの構成

IBBelleは二つの独立した系から構成されており、一つは、二酸化炭素を冷却するためのフロン冷凍機の系で、もう一つがVXDを冷却する二酸化炭素を送液ポンプ(ダイヤフラムポンプ)を使って循環する系である。

このうち、フロン冷凍機の系は、冷媒としてフロンR404Aを使用したチラーとなっている。構成は、二段圧縮一段膨張冷凍機となっており、凝縮器として空冷凝縮ファン2基、水冷凝縮器1基を備えている。このフロン冷凍機は、熱交換器を介して二酸化炭素を冷却して液化する。

液化した二酸化炭素は、二酸化炭素循環系の圧力容器(アキュームレーター)に飽和温度-20℃@20 barの気液飽和状態で貯められる。この圧力容器から出た液化二酸化炭素は、ダイヤフラムポンプによって押し出され、長い真空断熱二重化配管を経て実験ホール内のジャンクションボックスに行き着く。ここで二股に分かれて、それぞれがBelle II測定器の左右に対応する2つのマニホールドに導かれる。それぞれのマニホールドから複数の細い配管に分かれBelle II測定器の左右から検出器内部の経路に接続される。この検出器内部では熱負荷を受けて-20℃@20 barの気液二相状態で圧力温度ほぼ一定のまま熱を取り去りながら経路内を巡る。熱負荷を受け乾き度が高くなった二酸化炭素は、やがて検出器を出て、往路と同じ経路を経てIBBelleに戻り、フロン冷凍機により再冷却・液化され、そしてまた循環される(図2)。

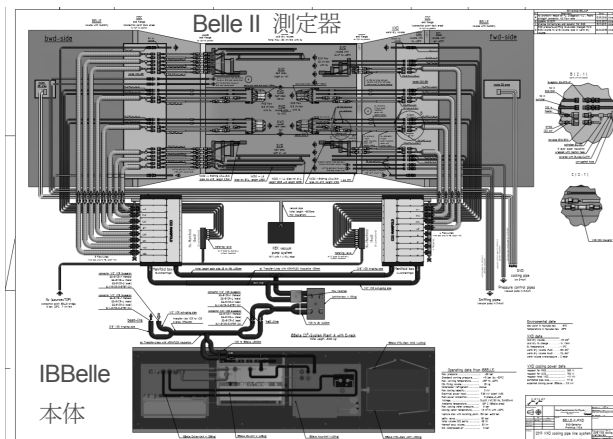


図2. IBBelle 全体図

■ IBBelleの運用について

IBBelleの制御は、PLC (programmable logic controller)とPC上での制御ソフトウェア EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) の組み合わせで構成されている。EPICSは、分散化されたプログラム構造を持つリアルタイムコントローラーを実現するソフトウェア集合体で、高性能なデータ収集とマンマシンインターフェースを提供できる。ネットワークでの使用に大きな利点を持ち、Belle II実験のような国際協力実験においては、国外からのモニターや制御が必要となり、EPICSは安全なネットワーク環境と共にこの機能を提供している。

ドイツMPPグループと協力してKEKへの導入・整備と運転・監視・異常対応等を行っている。本格的な連続運転が始まった当初は、異常停止が頻発した。電力系統からの擾乱に弱いことがわかり瞬停補償装置を組込んで対応した。また、構成機器のフロン圧縮機の動作不良が発生し、急遽ドイツから輸送して予備機と交換をした。システムの構成機器や各種部品が外国製ということで異常時の対応・修理・メンテナンス等で苦労をした。システムの理解度の向上、異常対策、保守等により徐々に安定度は増している。IBBelleは2018年3月以降Belle II実験で使用されているが、実験期間中の故障は無く、安定した運転を続けており、Belle II実験の遂行に貢献している。