

酸素同位体¹⁸O 分離装置の保冷槽設計

Design of Cold Box for Oxygen-18 Separation Unit

石川 孝 則* 岡 村 信 宏* 市 川 泰 司* 浅 野 道*
 ISHIKAWA Takanori OKAMURA Nobuhiro ICHIKAWA Yasushi ASANO Naoshi

酸素同位体¹⁸O 蒸留分離装置は、通常の深冷空気分離装置と異なり、外径が小さく細長い多数の蒸留塔と小口径配管を保冷槽内部に配置した特殊な装置であり、設計にあたっては外部からの熱侵入を防ぐ対策や分割輸送方法など従来にない工夫が必要であった。保冷槽は高層かつ断面積が小さい形状となったため、地震や風荷重に対する強度を確保するために外階段方式を採用した。さらに風洞実験を行い、強風速域で発生するカルマン渦による共振に対する保冷槽の強度を確認した。

Our Oxygen-18 distillation unit is unique, compared with ordinary cryogenic air separation units, in its cold box equipped with a variety of long columns and pipings with very small diameters. This cold box was newly designed to minimize heat leaks and also to make the unit divisionable for the ease of its transportation. As this cold box is exceptionally tall and slender, a special structure with external stairs and stages were installed independently to it in order to secure its resistance to earthquakes and strong winds. The intensity of the cold box to resonance by Karman vortex in high wind velocities was verified by wind tunnel experiments.

1. はじめに

酸素18安定同位体標識水(以下 Water-¹⁸O)は、ガンの全身検査に有効である陽電子断層撮影 Positron Emission Tomography (PET) 用検査製剤の原料であり、従来、水蒸留法や一酸化窒素蒸留法により製造されている。今回設計した装置は、酸素蒸留分離法により工業レベルで酸素同位体¹⁸Oを分離し、Water-¹⁸Oを製造する世界で初めての装置であり、生産量は100 kg/年と世界最大規模である。

一般的に深冷蒸留分離装置は、コールドボックス(保冷槽)と呼ばれる構造物の内部に、蒸留塔や熱交換器などの機器、配管、バルブ等を配置し、断熱材を充填している。この保冷槽の役割は、内部を極低温状態に保つとともに、気温の変化、地震、風などの影響を受けず、極低温での酸素蒸留分離を安定して行わせることにある。本装置の保冷槽内部は、通常の深冷蒸留分離装置と異なり、8N以上の超高純度酸素を製造する超高純度酸素蒸留分離部および、この超高純度酸素から¹⁸Oを分離する酸素同位体蒸留分離部(¹⁸O装置)から構成されている。

* オンサイト・プラント事業本部プラント・エンジニアリングセンター設計部

本稿では、保冷槽内部、保冷槽本体の設計、および強度の確認を目的とした模型による風洞実験について述べる。

2. 保冷槽内部の設計

運転温度が-180℃に達する機器や配管が、保冷槽内部に収納されている。その設計にあたっては、極低温による機器・配管の熱変形、外部からの熱侵入、不純物の固化、析出対策など長年に亘る深冷空気分離装置の設計で培った設計手法と経験的知識を応用した。

2.1 機器配置

¹⁸Oを分離するためには数百mにおよぶ非常に長い蒸留塔が必要である。そのため、プロセスの基本設計において、蒸留塔を13塔に分割するとともに、後段に進むにつれて塔径が小さくなるステップカスケード方式を採用した。また、次章に示す保冷槽の6分割輸送に対応するため、詳細設計において、各蒸留塔は現地溶接がないように、保冷槽に合わせて分割し、個々の保冷槽内部に配置した。分割した蒸留塔とともに、凝縮器の寒冷源として必要な液化窒素の貯槽、熱交換器、バルブ等がプロセス上、問題がなく、また、保冷槽ができる限りコンパクトになるように配置した。

保冷槽内部に配置する蒸留塔には外径50mm以下、長さ20m以上と極細のものもある。このため、保冷槽内部への組み込み、現地据付時の垂直精度、外部からの熱侵入を防ぐ対策を考慮した架台が必要であった。また、通常の深冷空気分離装置のように蒸留塔ごとに架台を設置すると、外部からの熱侵入が増すとともに、架台設置のためのスペースが必要となり、蒸留塔の間隔が大きくなり保冷槽が大きくなる。このため、Fig. 1に示したように複数本の蒸留塔をまとめて支持できる架台とした。この架台は現地据付後、蒸留塔ごとに垂直精度を調整でき、装置起動時に起こる各蒸留塔間の熱収縮量の差を吸収できる構造とした。



Fig. 1 Internal equipments and support.

2.2 配管設計

^{18}O 装置内の配管には、大小様々な口径の配管を用いている。特に、ステップカスケードを用いた蒸留プロセスの後段は、機器や配管に流れる流体の量が非常に少ないため、それに適した内径4.35mmの小口径配管(チューブ管)を使用している。 ^{18}O の製造は超高純度ガスが必要であり、チューブ管を含む全プロセス配管には、溶接部のわずかな隙間に不純物となるガスや液化ガスが残留することを避けるため、突き合せ溶接継手を使用した。また、チューブ管は口径が小さく通常の深冷空気分離装置のように乾燥空気または窒素によるパージが十分にできない可能性があるため、 ^{18}O 装置には真空引きによるパージができるシステムを設置した。

通常の深冷空気分離装置では保冷槽内に占める蒸留塔の容積が大きく、運転開始後、蒸留塔本体が冷却されることで、比較的短時間で蒸留塔周囲の断熱材が冷却され、装置全体が極低温状態となる。また運転中においても、外槽表面からある一定の断熱距離を確保することで外部からの熱侵入を防ぐことができ、安定した蒸留分離を行わせることができる。一方、 ^{18}O 装

置は蒸留塔が極細で熱容量が小さいため、運転開始後、装置全体が極低温状態で安定するまでに時間を要することや、外部からの熱侵入により不安定な運転状態になることが懸念された。そこで、凝縮器の寒冷源として敷設される大口径の液化窒素配管を、蒸留塔やチューブ管の近くに配置することで、これらの影響を極力抑えることとした。さらに、配管内流速が遅く蒸発しやすい液化ガスのプロセス配管については、液化窒素での冷却が可能な二重管を設置し、外部からの熱侵入対策を行った。

3. 保冷槽の設計

保冷槽の設計では、内部機器の配置による大きさの制約、高圧ガス保安法等の法規、規格による強度の確保、輸送による制限等を考慮した。

3.1 保冷槽の構造

^{18}O 装置の保冷槽の寸法は、内部機器のサイズ、および配置により平面寸法3.5m×7m、高さ寸法70mとなる。この保冷槽を一体化して陸上輸送することは不可能であり、最初から現地で組み上げる現地組立方式および、社内工場一度組み立てた保冷槽を分割して輸送し、現地で再度組み立てる分割輸送方式による製作方法について検討した。

^{18}O 装置には多くの小口径配管が使用されており、閉塞の原因となる埃や粉塵の侵入を防止する必要がある。このため、現地で組み立てる範囲を最小限にできる分割輸送方式を採用し、保冷槽は平面方向2分割、高さ方向3分割の合計6分割とした。Fig. 2, Fig. 3に保冷槽の現地据え付け工事を示す。

保冷槽には、弁や計器の操作、保守、点検用とし



Fig. 2 Installation of divided cold box.



Fig. 3 Installation of cold box.

て歩廊，階段も設置される。通常の深冷空気分離装置では歩廊，階段は保冷槽から支持することが一般的であるが，¹⁸O装置の保冷槽は，高さが70mあり，断面積も3.5m×7mと小さいため，保冷槽本体だけは地震や風荷重に対する強度確保に問題があり補強が必要であった。このため，保冷槽の補強を兼ねて，断面積が3.5m×7mの構造物に保冷槽の階段を配置した外階段方式を採用した。Fig. 4の保冷槽モデルに示すように，保冷槽部と保冷槽階段部を一体として断面積7m×7mとし，地震，風荷重に対する強度を確保した。



Fig. 4 Cold box model of O-18 separation unit.

3.2 保冷槽の強度

通常の深冷空気分離装置の保冷槽では，過去の実績などを参考に使用する部材を選定し，最終的に有限要素法による応力計算により強度を確認する。通常の保冷槽の高さは，高いもので50m程度，細長比（平面方向と高さの比）は約1：3から1：5である。また，風により保冷槽の周囲で発生するカルマン渦による共振は，比較的低風速域で起こるため，外槽強度において致命的な問題とはならない。一方，¹⁸O装置の保冷槽の場合，カルマン渦による共振が強風速域で起こることを計算により確認した。しかし，¹⁸O装置の保冷槽は高さが70m，保冷槽部と外階段部を合わせても細長比が1：10と従来の保冷槽には例のない細長い形状であり，また一般的な建築構造物にも例が少なく知見もなかったため，十分な強度検討ができなかった。そこで，強風速域でのカルマン渦による共振の検討のため，模型による風洞実験を実施し保冷槽の強度確認を行った。

3.3 風洞実験

風洞実験は Fig. 5に示すフジタ技術センターの大型境界層風洞装置を使用して行った。

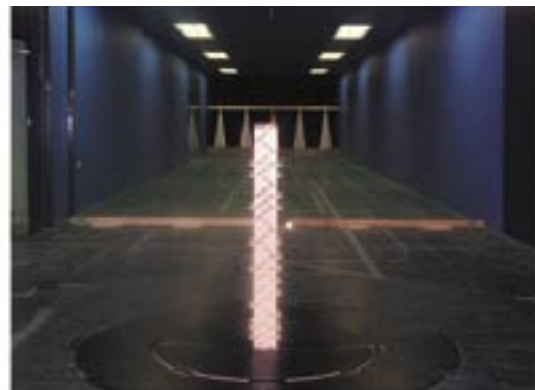


Fig. 5 The facility of large-size wind tunnel test.

Fig. 6に保冷槽と外階段が一体構造の断面図（モデルA）を示す。また，Fig. 7に外階段のない通常の保冷槽の断面図（モデルB）を示す。なお，保冷槽の幅3.5mの面はX方向（90°）とし，7mの面はY方向（0°）とした。

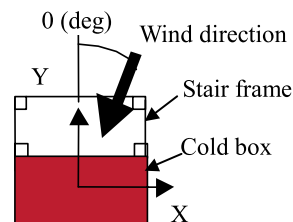


Fig. 6 Model-A

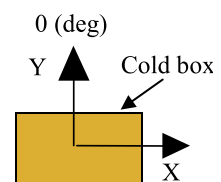


Fig. 7 Model-B

風洞実験は実験装置の回転架上にモデルを配置し、保冷槽を回転させることで保冷槽に当たる風向を変化させ、モデルの底部(地上部)の歪ゲージにより X, Y 方向の曲げモーメント(転倒モーメント)を測定した。さらに、今回の実験では、今後の保冷槽設計に有効な知見が得られる様、種々の補強部材を追加して6種類のモデルを作成して行った。ここでは保冷槽と外階段が一体構造である保冷槽(モデル A)と、外階段のない通常の保冷槽(モデル B)の2種類についてのみ示す。

Fig. 8 に設計最大風速 51 m/s における風向(角度)と X 方向の転倒モーメント係数との関係を示す。X 方向の転倒モーメントは風向が 0° ないし 180° 付近で大きい値を示した。また、外階段がある保冷槽(モデル A)の転倒モーメントは、設計値以下であったが、外階段がない保冷槽(モデル B)の転倒モーメントは、風向が 0° ないし 180° 付近では設計値を上回る結果が得られた。

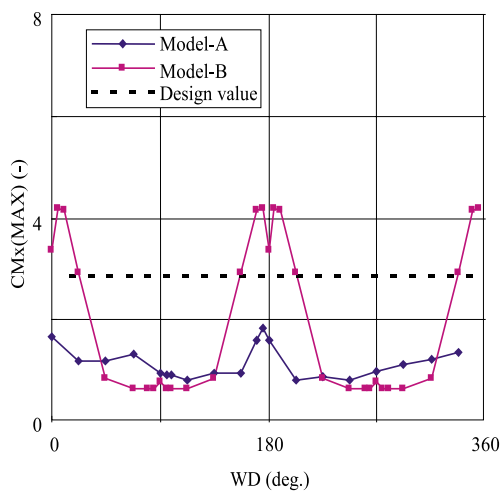


Fig. 8 Overturning moment of X direction.
CM : Factor of overturning moment, WD : Wind direction
Design value : 2.86 (Factor of overturning moment in wind velocity 51 m/s)

Fig. 9 に、設計最大風速 51 m/s における風向(角度)と保冷槽の Y 方向の転倒モーメント係数との関係を示す。モデル A の Y 方向の転倒モーメントは、どの風向に対してもほぼ一定の値を示した。またモデル B の Y 方向の転倒モーメントは、風向が 0°, 90°, 180°, 270° 付近で大きな値を示すが、Fig. 8 で示した X 方向ほど大きな転倒モーメントは発生せず、モデル A, モデル B ともに設計値以下の転倒モーメントであった。

Fig. 10 に保冷槽にかかる風向(角度)が 0° にお

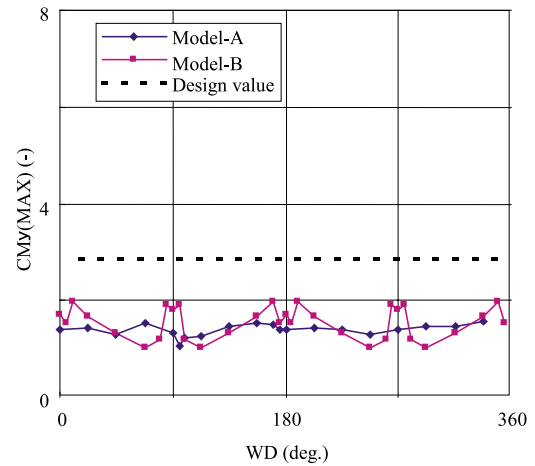


Fig. 9 Overturning moment of Y direction.
CM : Factor of overturning moment, WD : Wind direction
Design value : 2.86 (Factor of overturning moment in wind velocity 51 m/s)

ける風速と保冷槽の X 方向の転倒モーメント係数との関係を示す。X 方向の転倒モーメントは、風速が 50 m/s を越えると急激に大きくなり、70 m/s 付近で小さくなった。

設計最大風速 51 m/s 付近において、モデル A の転倒モーメントは設計値以下であったが、モデル B は設計値を大きく上回る転倒モーメントが発生した。

保冷槽モデル B をベースに補強部材を追加したモデルに関しては、モデル B の転倒モーメントより小さい値であるが、モデル B と同様の傾向が見られることを確認している。

以上の結果から、外階段のない通常の保冷槽では、強風速域でのカルマン渦による共振に対して強度が不足するが、外階段を設置した保冷槽は全体の断面積が

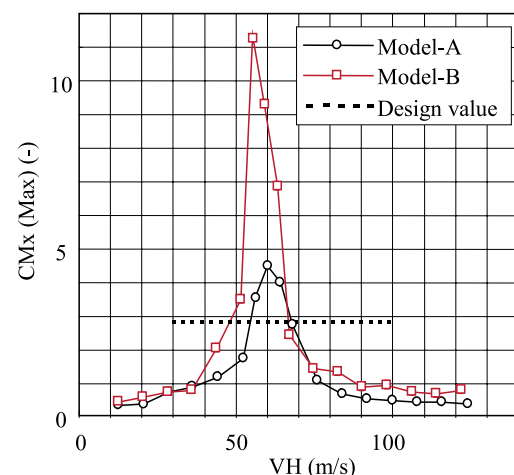


Fig. 10 Overturning moment of X direction at 0 (deg.) .
CM : Factor of overturning moment, VH : Wind velocity
Design value : 2.86

大きくなり、共振に対して十分な強度が得られることがわかった。

4. まとめ

¹⁸O 装置における保冷槽内部の設計は、通常の深冷空気分離装置とは異なる発想、工夫が必要であったが、長年に亘る深冷空気分離装置の設計で培った設計手法と経験的知識を応用し、プロセス設計の要求を満足する装置を設計することができた。また、高層かつ

断面積が小さい¹⁸O 装置の保冷槽は、風洞実験によりカルマン渦による共振に対して十分な強度が得られることを確認するとともに、今後の設計の指針となる技術的な知識を得ることができた。

謝 辞

風洞実験にご協力を頂いたコンストラクションマネージメントジャパン株式会社殿、並びに株式会社フジタ技術センター殿に感謝の意を表します。