

## 2.1.6 液化天然ガス (LNG) の冷熱利用

LNG は $-162^{\circ}\text{C}$ なので、再ガス化の前に冷熱を有効に利用する複数の方法が実用化され、受入基地の内部と、近接している工場と倉庫で利用されています。方法は冷熱発電、貯蔵中に蒸発したガスの再液化、空気分離による液体酸素と液体窒素の製造、液化炭酸の製造、冷蔵倉庫の 5 種類です。それでも冷熱の一部利用に過ぎないので、今後の用途開発が望まれます。

LNG の再ガス化には、 $-162^{\circ}\text{C}$ から常温にまで昇温させる顕熱と、蒸発に必要な潜熱の合計で、1 kg あたり 880kJ の熱を与える必要があります。通常、この熱源には海水を使っていますが、言い換えれば、このとき海水にせっきくの冷熱を捨てることになります。そこでこれまでに、LNG 受入基地内で LNG の冷熱を利用する方法と、基地の外に LNG を搬出して利用する方法が考案され実用化されてきました。LNG 受入基地内で利用する方法は、冷熱発電と BOG (ボイルオフガス：蒸発した LNG) 再液化の 2 種類です。基地の外に搬出して利用する方法は、空気分離による液体酸素と液体窒素の製造、液化炭酸の製造、冷蔵倉庫の 3 種類です。

### 1. 冷熱発電

LNG 冷熱発電には、作動媒体を使う 2 次媒体サイクル、LNG を膨張させる直接膨張サイクル、両者を組み合わせた 2 次媒体・直接膨張組み合わせサイクルがあります。2 次媒体サイクルでは、作動媒体にメタンとエタンの混合液を使用します。図 1 に示すように LNG の冷熱で液化した作動媒体を海水で気化し、圧力と温度を高めてタービンを駆動させ、同軸の発電機で発電します。タービンで膨張しガス化した作動媒体は、LNG の冷熱で凝縮させ、再び海水を熱源とする気化器に送ります。

2 次媒体サイクルで得られる電力量は、LNG1 トンあたり約 30kWh です

直接膨張サイクルでは、図 2 に示すように LNG を海水気化器で直接気化させ、タービンを駆動して発電します。作動媒体を使わないので、サイクルとしては 2 次媒体サイクルより単純ですが、低温の LNG で直接タービンを駆動させるので、設備に厳しい低温対策が必要になります。直接膨張

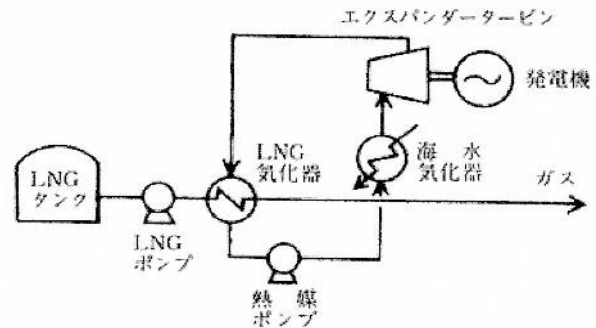


図 1. 二次媒体サイクル

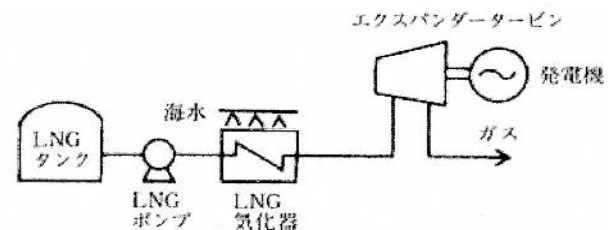


図 2. 直接膨張サイクル

サイクルで得られる電力量は、LNG1 トンあたりの約 40kWh です。

2 次媒体・直接膨張組み合わせサイクルでは、図 3 に示すように LNG の冷熱を $-162^{\circ}\text{C}$ から $-35^{\circ}\text{C}$ 程度まで 2 次媒体サイクルで、そこから数段階の直接膨張サイクルを使用して発電します。設備構成が複雑になるので設備費も大きくなりますが、得られる電力は最も大きく LNG1 トンあたり

約 50kWh になります。2018 年の時点で、国内で稼働している LNG 冷熱発電設備は、約 10 基で総出力は約 8 万 kW と推察されます。

LNG をガス化する前の液体の段階で加圧します。理由は液体加圧の方が、ガス加圧よりはるかに少ないエネルギー消費で済むからです。一方、LNG

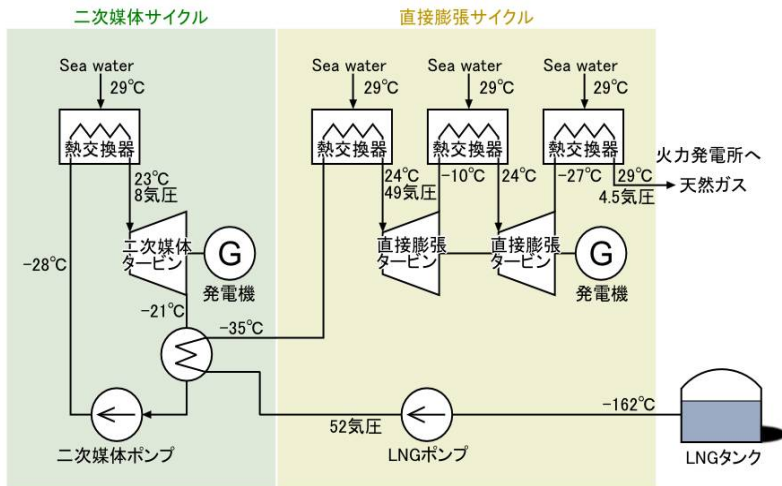


図 3. 二次媒体・直接膨張組み合わせサイクル（事例）

G は低温貯蔵している間に、外部からの自然入熱で一部が蒸発し、低圧のガス（BOG：ボイルオフガス）が発生します。このガスもユーザーに送り出す前に加圧する必要があるため、LNG の冷熱で再度液化し、加圧してから再びガスに戻します。図 4 が BOG（ボイルオフガス）再液化プロセスで、発生した BOG を液化に必要な 6～10 気圧（0.6～1.0MPa）程度に昇圧し、次にプレートフィン熱交換器を使い LNG 冷熱で液化します。次にその下流で 40 気

圧（4.0MPa）程度に加圧し、最後に原料 LNG とともに気化器でガス化します。

## 2. BOG（ボイルオフガス）再液化

LNG 受入基地でガス化した天然ガス（NG）は、主なユーザーである発電所や都市ガスライン側から、約 30 気圧（3MPa）の加圧状態で送り出すことが求められています。このため受入基地では、

## 3. 空気分離

空気は主成分が 78%の窒素と 21%の酸素なので、

大量に必要な工業用酸素と窒素の原料になっています。空気から酸素や窒素を製造するには、酸素と窒素の蒸気圧の差を利用し、多数の棚段がある蒸留装置で分離します。蒸留塔は塔低液の一部を蒸発器で蒸発させるか、または塔低から気体の原料を送入し、塔内を上昇する蒸気に行します。一方、塔頂から出る蒸気は冷却して凝縮させ、塔内に戻して塔内を落下する還流液に行します。棚段では

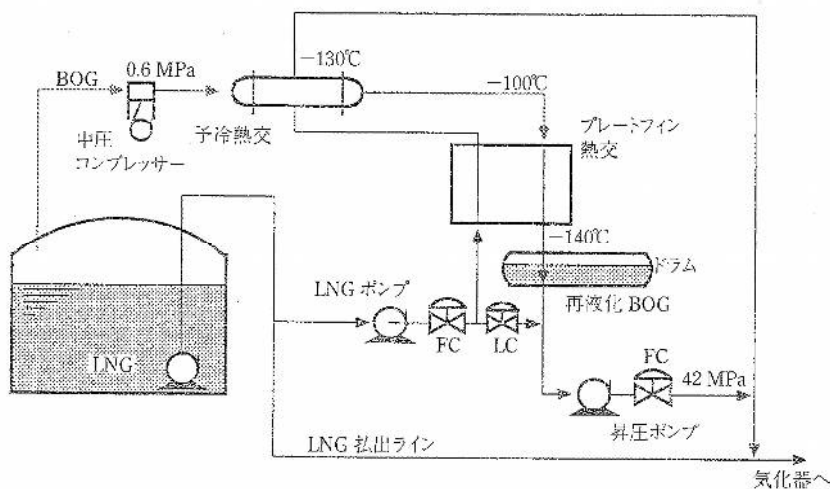


図 4. BOG（ボイルオフガス）再液化プロセス

下部から上昇する蒸気と上部から落下する還流液が接触し、塔頂には沸点の低い成分が、塔底には沸点の高い成分が濃縮します。

空気分離の場合は塔頂部に沸点がマイナス196℃の窒素が、塔低部には沸点がマイナス186℃の酸素が濃縮するので、これを抜き出して製品にします。図5に一般的な深冷空気分離装置の仕組みを示しますが、蒸留塔は100～150段で、段の間隔は100mm前後です。圧力の違う二本の塔を組合せて使い、装置材料には低温脆性に耐えられるアルミニウムを使用します。原料空気は水分と炭酸ガスを除去してから、熱交換器で製品酸素や窒素で冷却し、蒸留装置に送り込まれます。蒸留装置で得られた低温の酸素と窒素は、原料空気を冷却すると同時に自らはガス化して気体の酸素と窒素になります。この仕組みだと製品冷熱のほとんどを原料の冷却に利用するので、装置全体では熱の出入りが少なく高効率で操業できます。しかし、製品酸素と窒素がほぼ常温の気体なので、大量の遠距離輸送には不向きです。目的製品が工場で使用する気体の酸素と窒素なら、LNGの冷熱を利用する利点がないのです。

一方、目的製品が大量輸送に適した液体の酸素と窒素の場合は、図5の主熱交換器における原料

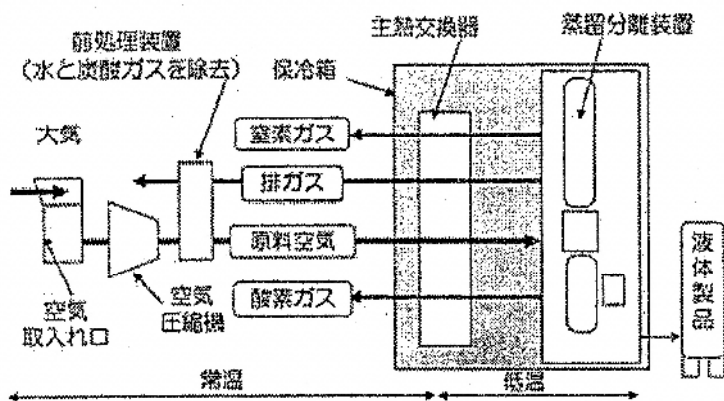


図5. 空気深冷分離の仕組み

空気の冷却に LNG の冷熱を利用し、製品酸素と窒素は冷熱を保持したまま液体製品にします。蒸留設備は図6に示すような低压塔と高压塔で構成するダブルコラムが一般的で、原料空気は LNG の冷熱で冷却され、気体のまま高压蒸留塔に送られます。高压蒸留塔の塔頂部には凝縮器があり、ここで液化された還流液が棚段を落下しながら上昇する空気と気液接触します。その結果、塔頂部からは高濃度の窒素が、塔低部からは低窒素濃度の液体空気が得られます。高压蒸留塔で得られた液体空気は低压蒸留塔に送られ、高濃度の酸素と窒素に分離します。なお、図6では煩雑さを避けるために、アルゴンの分離工程を省略しています。2001年の時点では、7ヶ所の LNG 基地で、冷熱を利用した空気分離装置が稼働しています。液体酸素は製鋼、化学工業、医療、宇宙ロケットなどに使われています。液体窒素は急速冷凍、凍結粉碎、低温手術、冷凍輸送、ICの製造工程などに使われています。

#### 4. 液化炭酸

液化炭酸ガスやドライアイスを製造する場合、原料炭酸ガスの選択が一つの課題です。ボイラーの燃焼ガスなら、どこでも容易に得られますが、燃焼ガスには窒素や残留酸素が含まれています。一方、製油所の水素製造装置で発生する副生炭酸ガスは、炭酸ガスの純度が高いので原料炭酸ガスに適しています。このため、LNGの冷熱を利用して液化炭酸を製造する工場は、LNGの受入基地に近く、同時に製油所にも近い3ヶ所です。

図7が代表的な工程で、LNGの冷熱は冷媒液(R-23:HFC)と熱交換し、間接的に炭酸ガスを冷却して液化します。ドライアイスは液化炭酸ガス

## 5. 冷蔵倉庫

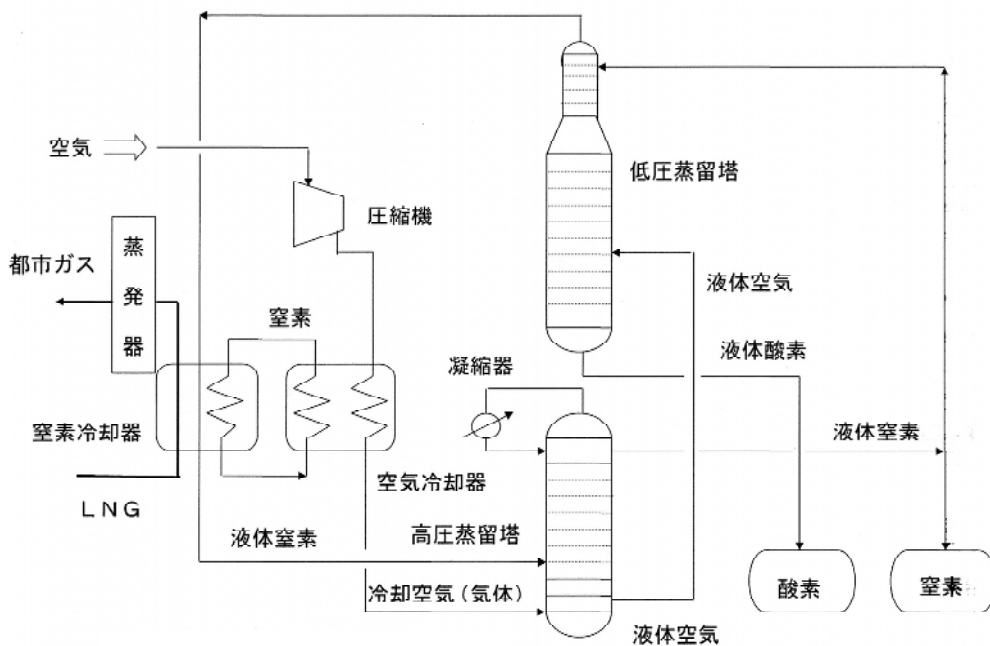


図 6. 空気深冷分離プロセス

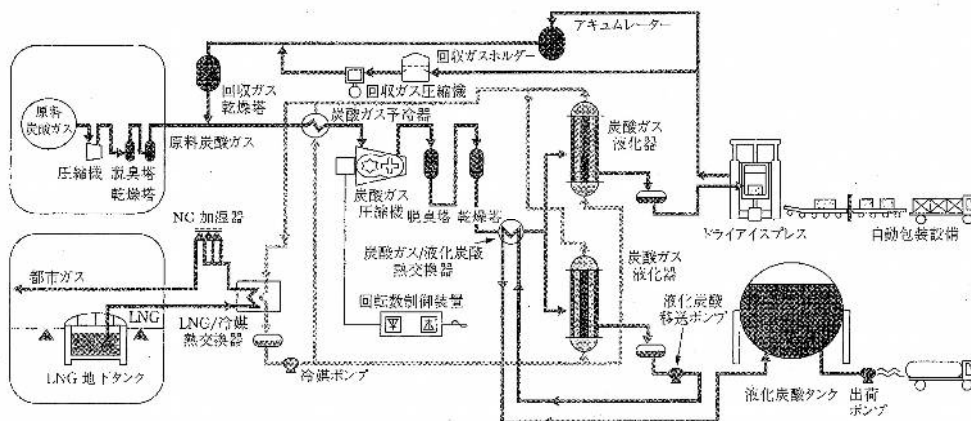


図 7. 炭酸ガス液化フローシート

を断熱膨張させてスノー状にし、プレスで 25 センチ角程度の立方体に圧縮成型します。液化炭酸ガスの需要は、主に飲料、食品、化学、鉄鋼などの分野です。飲料ではコーラやサイダーなどの封入用、食品では急速冷凍用、食品保存用、香辛料の抽出用などに使われています。化学分野では消火剤、廃水中和剤、尿素原料、炭酸ソーダ原料などに使われています。

からです。その上の $-50^{\circ}\text{C}$ の冷蔵室では、脂肪の少ない海老類を、 $-40^{\circ}\text{C}$ の冷蔵室は魚や肉の保存に利用しています。LNG の温度は冷蔵室の温度よりかなり低いので、冷蔵室の冷却には $-75^{\circ}\text{C}$ 程度で循環する冷媒 (R-22:HFC) を使い、LNG は間接的に冷媒を冷却する方式が採用されています。

(おわり)

参考：エネルギー便覧

石油天然ガス・金属鉱物資源機構資料