

**特集：プラント圧力設備の基礎****第1部：プラントの種類と圧力設備**

T&amp;Tテクノロジー

田原 隆康

**1. はじめに**

石油精製、石油化学、電力・ガスなどプラントには多くの圧力設備が使われています。これらの圧力設備の製作には各種の溶接技術が採用されており、それらの品質を維持する上で、溶接管理技術者は、圧力設備の用途、適用環境、技術基準なども理解しておく必要があります。ここでは、溶接管理技術者が、プラント圧力設備の基礎的理解を深める目的でプラントの種類と圧力設備についてまとめています。

**2. 圧力設備(圧力容器)とは<sup>1),2)</sup>**

圧力設備とは、圧力容器と配管の総称です。圧力容器とは、大気圧を超える圧力を保持する容器、圧力を発生する流体（気体、液体）を内蔵する容器、又は外圧を受ける容器のことです。広義では、ボイラ、貯槽なども圧力容器となります。圧力を受ける配管も圧力容器の一種といえます。

圧力容器は、各種の製造工業、発電（火力、原子力など）、交通や物流など、産業の多くの分野で根幹的設備の一つとして、重要な役割を演じています。

産業で汎用される圧力容器は、移動容器(ボンベ)の類から、熱交換器、反応器、さらに原子力容器、最近では燃料水素蓄圧器に至るまで、広い分野にあり、圧力、温度条件や使用環境も大幅に異なります。

圧力では1 GPa、温度では600℃の高温の使用条件まで実用に供されています。このように圧力容器は、熱機関や石油・化学工業での高温、高圧、大容量化に伴って発展してきましたが、一方で、産業と民生のあらゆる分野での中小圧力容器や特殊容器の進歩も著しく、機械、造船、鉄構などで広く製作されてきました。

しかし、石炭、石油などのエネルギー産業が爆発的に開発、利用されてきた約1世紀前を振り返ると、米国におけるボイラの急増にともなう爆発事故の続出、欧州での圧力容器のぜい性破壊事故から、ボイラ及び圧力容器の安全確保は、人命の保護と経済的な本質の観点で、重要な課題でした。ASME（米国機械学会）のボイラ及び圧力容器規格(Boiler & Pressure Vessel Codes)の制定や、TUEV(ドイツ技術検査協会)の設立と圧力容器諸規制の制定は、主としてここに由来しています。

このように圧力容器には、各国とも古くから特別の法令を定め、法令によって設計、製作、検査を規制し、安全性を確保してきました。

これは、圧力容器が潜在的な破裂危険性を持つからです。化学プラントなどで使用される圧力容器には、さらに、爆発危険性、火災危険性、中毒危険性が懸念されます。

### 3. プラントの種類と圧力設備

#### 3.1 プラントの種類<sup>3)</sup>

圧力設備は、広い産業分野で使用されていますが、それらが集約された装置を通常プラントと呼んでいます。プラントの代表例として石油精製プラント、石油化学・化学プラント及びガス・LNG プラントについてその概要を紹介します。

##### 3.1.1 石油精製プラント

石油精製プラントは、原油を熱、水素、触媒などを用いて、LPG からアスファルトまでの各種製品に加工する各種プロセスの集合した装置であり、その代表的な石油精製プロセスを図 1 に示します。

石油精製装置では、石油化学装置と異なり、主構成材料は炭素鋼又は低合金鋼ですが、一部にステンレス鋼が配管又はクラッド材料として、採用されています。

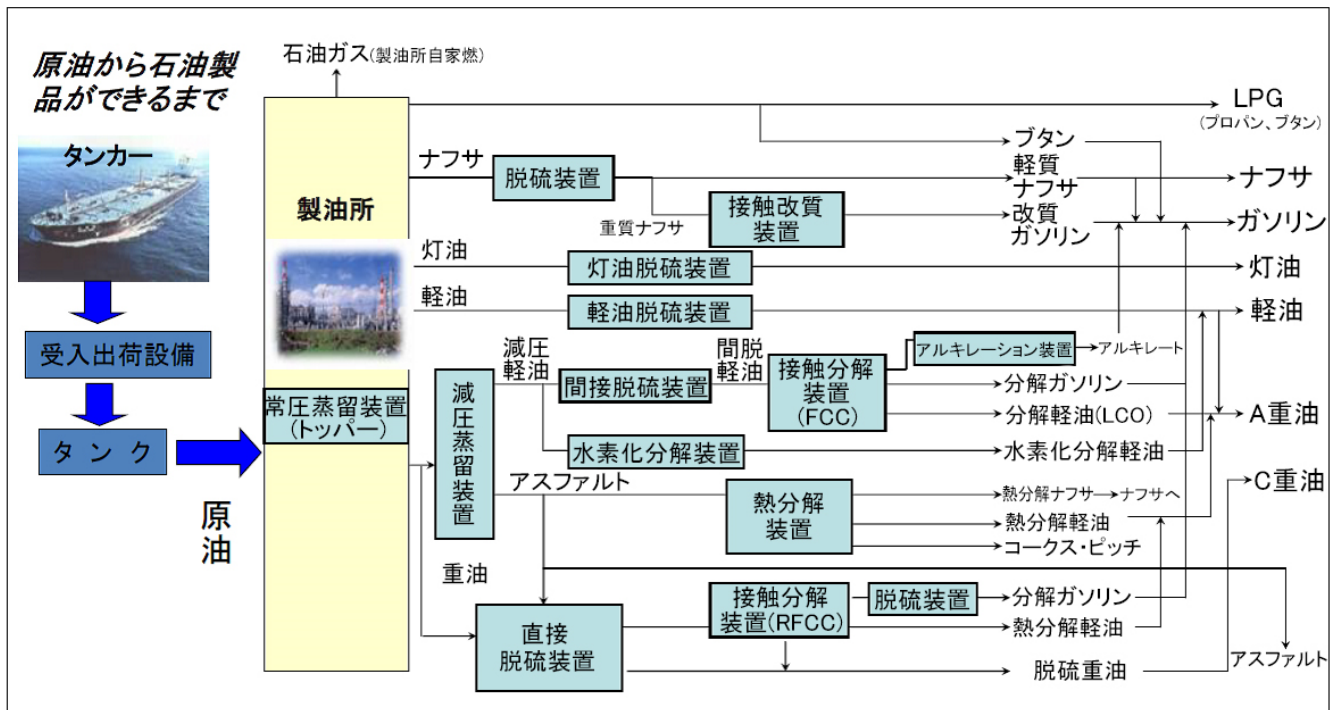


図 1 石油精製プロセスフロー

##### (1) 常圧蒸留装置

原油を最初に処理する装置は、常圧蒸留装置（別名 トッパー）と呼ばれ、内部に設置されたトレイと呼ばれる孔の空いた仕切り板又は充填物にて、高温蒸気にて大気圧（0.1013MPa）より少し高い圧力で原油を沸点ごとに分ける（分留する）設備です。大きさは直径 10 数 m で高さが 50m にもおよぶ製油所でのメインタワーです。この材料は上部が塩化物腐食対策で炭素鋼にフェライト系ステンレス鋼のクラッド、近年はチタンのクラッド鋼が用いられています。又、この塔の下部は原油中に含まれている硫黄分による高温硫化物腐食対策で、フェライト系ステンレスクラッド鋼が用いられています。

この装置における低温環境では、凝縮水分に溶解した硫化水素による低温硫化物腐食が問題となり、腐食のみならず割れ、特に HIC と呼ばれる特異な形の割れを鋼材に引き起こすことが知られ、近年では、不純物を低下させた清浄鋼などが使用されています。

その下流プロセスとしては、液化石油ガス (LPG)、ナフサ、ガソリン、灯油、軽油、重油、アスファルトまでを製品にする二次装置と呼ばれるプロセスが存在します。

## (2) 脱硫装置

大気環境面から灯油、ジェット燃料、軽油、A 重油などの燃料の脱硫を行うプロセスが脱硫装置と呼ばれる装置で、水素と触媒の存在下で留分に含まれる硫黄成分を硫化水素として取り除く装置です。この脱硫反応に必要な環境として的高温と水素分圧のため、使用する材料はクロム・モリブデンを含有した低合金鋼が用いられます。材料選定には、単に高温強度のみならず、高温硫化物腐食及び高温水素環境下での水素侵食と呼ばれる損傷を避けることが必要とされるからです。代表的な重油脱硫装置の反応塔などでは、肉厚 300 mm 程度、長さ 60 m、総重量 1000 トンにも及ぶものが製作されています。

この反応塔では、長手溶接継手減少による製作品質向上や供用中検査の短縮などの面から、厚板溶接構造より鍛造リング溶接型の塔が多く選ばれます。ステンレス鋼は、応力腐食割れと呼ばれる損傷を懸念して、無垢材が容器材料として選定されることは少なく、配管としてチタン、コロンビウム (ニオブウム) を添加した安定化ステンレス鋼が用いられます。

## (3) 重質油装置

重い留分の処理装置としては接触分解装置、又はコーカーと呼ばれる熱分解装置があります。

この処理プロセスは、主に高温下で重い留分を熱分解してガソリンなどの基材となる軽質分とより重いコークス、アスファルト留分などの製造を行います。

この装置では、主に高温硫化物腐食対策のためにクロム・モリブデン含有の低合金鋼の内面にフェライト系ステンレス鋼を合わせ材としたクラッド鋼が用いられます。

高温に伴う熱疲労・クリープなども鋼材材料選定の際に考慮されます。

### 3.1.2 石油化学・化学プラント<sup>4)-6)</sup>

化学プラントは原料を反応や分離させることにより化学物質を生産しますが、石油化学や天然ガス化学などの有機化学プラントと、アンモニアやソーダなどの無機化学プラントに大別されます。国内における 2015 年度の製品出荷額割合は有機化学 87%、無機化学 13%となっています。

石油化学プラントは、ナフサを熱分解してエチレンを製造するプロセスを中心に、ポリエチレンなどのプラスチック、テレフタル酸などの合成繊維原料、ポリウレタンなどの塗料原料など、さまざまな誘導品を産出するプラントが存在します。一般に化学プラントという場合は、石油化学プラントを指します。

石油化学プロセスの源流となるエチレンプラントの工程は、熱分解、冷却、圧縮、分離・精製から構成されています。基本的なブロックフローを図 2 に示します。エチレンプラントの運転温度範囲は、低温から高温まで非常に幅広いため、圧力設備には炭素鋼をはじめ、ステンレス鋼、ニッケル系合金、アルミニウムなど、多様な金属材料が使用されています。各工程の特徴及び、圧力設備に使用される材料の概要は以下の通りです。

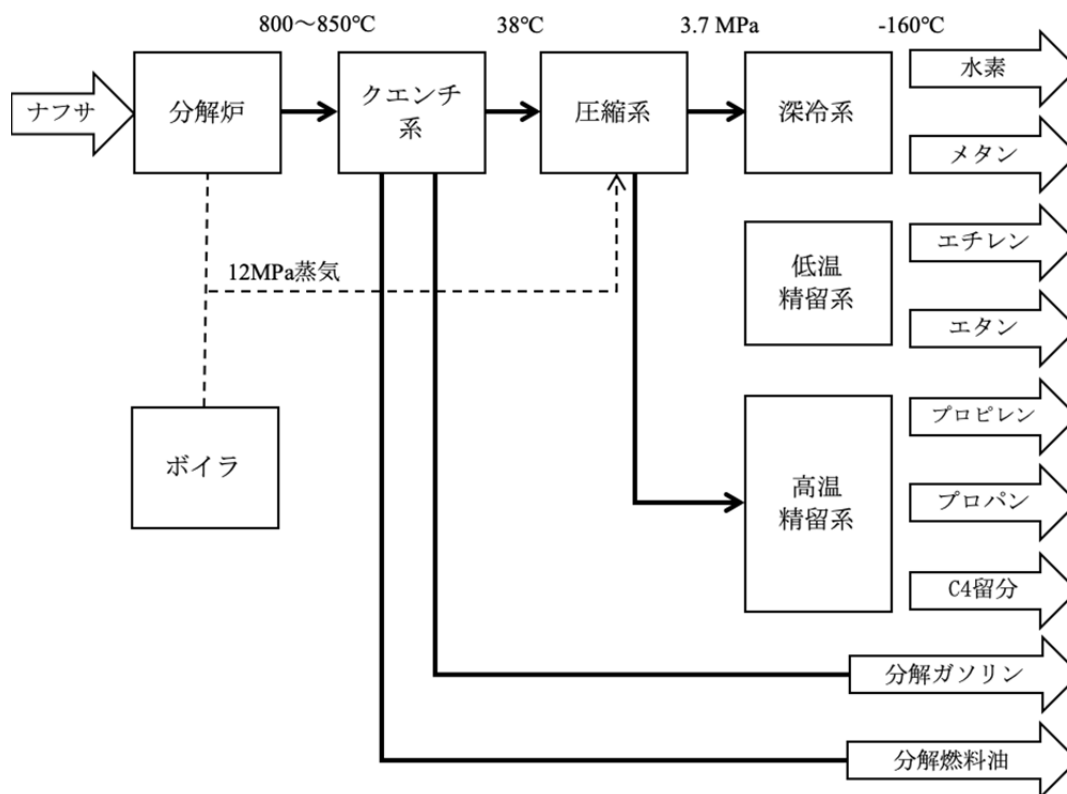


図2 エチレンプラントブロックフロー図

### (1) 熱分解

原料ナフサ（エタン、LPGなども可能）は希釈蒸気と共に分解炉に供給され、熱分解反応により、水素、メタン、エチレン、プロピレン、ベンゼン、重質燃料油などを含む分解ガスを生成させます。分解炉における予熱から熱分解までの温度範囲は130~1,000°Cであり、従って使用される材料も、炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、耐熱鋳鋼など様々です。分解炉の寿命は浸炭により決まるケースが多いことから、耐浸炭性を高めた高Cr-高Ni合金の開発が進んでいます。

分解炉を経た分解ガスは熱分解反応を停止させるために、TLEと呼ばれる熱交換器で350°C程度まで急冷されます。

### (2) 冷却

冷却された分解ガスはガソリン分留塔で重質成分が分離されます。次のクエンチ塔では塔の上部から噴霧した水と接触させることで、水分とガソリン成分(C5-C9)を凝縮分離します。蒸留塔などの圧力設備の材料には、一般に炭素鋼が使用されています。

### (3) 圧縮

苛性洗浄塔まわりには炭素鋼が使用されていますが、苛性ソーダに接触する部位には応力腐食割れが生じることがあるため、温度、苛性濃度によっては焼鈍が必要となります。

### (4) 分離・精製

圧縮工程で液化されたガスは、冷凍圧縮機を用いて-160°Cまで冷却され、水素を深冷分離します。深冷分離装置用の熱交換器材料として、一般にアルミニウムが使用されています。

水素を分離されたガスは、精留工程でメタン、エタン、エチレン、プロピレンの順に分離回収されます。分留塔の設計は ASME Sec VIII Div.1 などの圧力容器設計規格によって行われます。低温精留系の圧力設備は-23℃以下で使用されることから、低温液化ガスによるぜい性破壊を避けるため、アルミキルド鋼、ニッケル鋼、オーステナイト系ステンレス鋼などが使用されます。

### 3.1.3 ガス・LNG プラント <sup>7), 8)</sup>

近年、世界の天然ガス消費量は増加傾向にあります。これは天然ガスが、先進国を中心に石炭や石油などの従来のエネルギーに代わるクリーンエネルギーとして、発電用のみならず都市ガス用として普及しているためです。そして今後も天然ガスは、化石燃料の中でもっとも堅調な需要の増加が見込まれており、世界各地で大規模なガス開発が進められています。

天然ガスは井戸元から供給されるガスから、水分や酸性物質など、主成分であるメタン以外の成分を除去して製品化されます。ガス処理設備から使用先までパイプラインが敷設されている場合は、ガスそのまま製品を送り出すことが出来ますが、そうでない場合は、一度ガス処理設備で冷却し、液化して船で輸送する方が経済的です。このためガス処理設備にはガスの液化設備が付帯されることがあり、このガス処理と液化を行う設備が LNG プラントです。

LNG プラントのプロセスフローは、供給ガスの成分や、設計思想、プラントの規模により異なりますが、一般的なプロセスフロー概要と各プロセスに含まれる圧力容器は次の通りです。(図 3 にプロセスフロー概要を示します。)

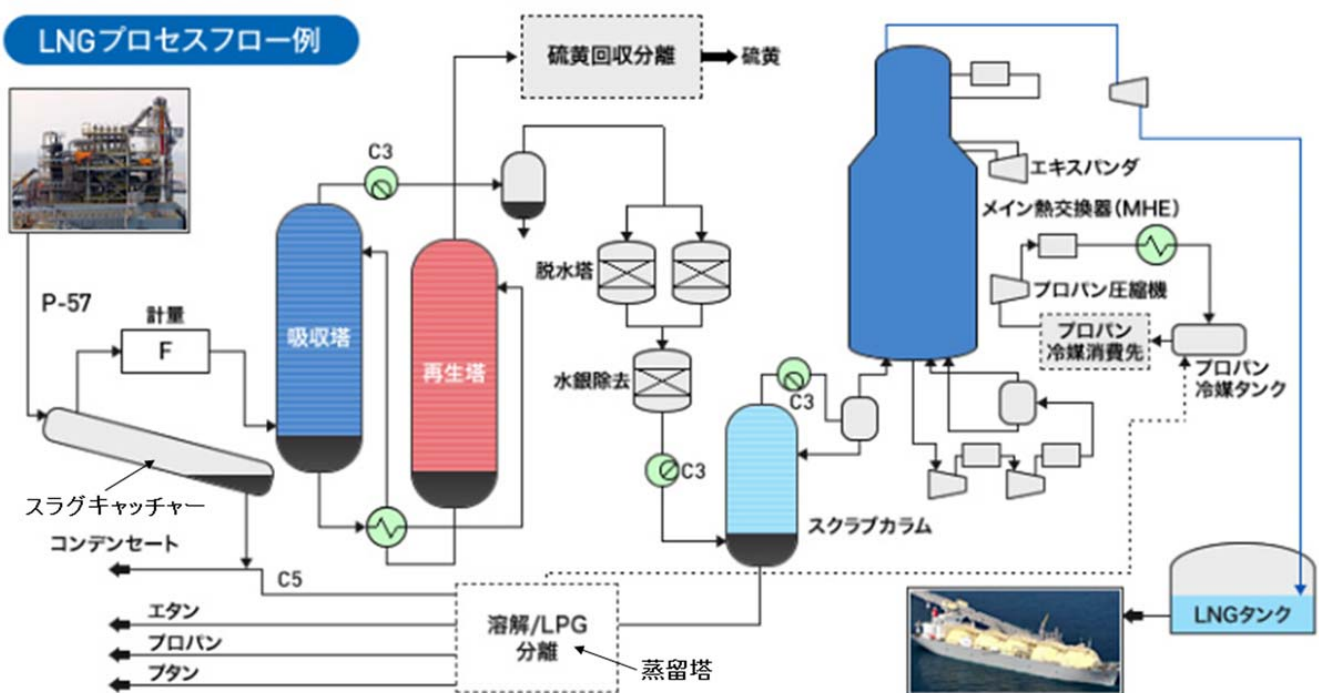


図 3 LNG プロセスフロー概要 (一例) <sup>9)</sup>

a) スラッグキャッチャーで気液分離して供給ガスに含まれる液体成分を除去

供給ガスにはガス以外にも液体が混ざっている場合があります、それをスラッグキャッチャーという装置で気体と液体の比重差を利用して分離します。通常、スラッグキャッチャーは工場にてひとつの装置として製作されますが、配管部材として配管コードを適用して設計されます。

b) 吸収塔で酸性成分を除去

供給ガスには二酸化炭素、硫化水素などの酸性ガスが含まれており、湿潤環境下にこれらの成分が存在していると腐食源となり下流の装置に損傷を与えるため、吸収塔でこれらの成分を除去します。酸性ガス吸収には一般にアミン溶液が用いられ、このアミン溶液が、吸収塔と再生塔を循環し、吸収塔で二酸化炭素及び硫化水素を吸収、再生塔でこれらを分離というサイクルを繰り返します。

c) 脱水塔で水分を除去

上記 b) のアミン溶液は水溶液であるため、酸性成分を除去したガス中の水分は飽和状態となっています。この水分が後続の冷却プロセスまで残っていると、凝固して装置を損傷してしまうため、あらかじめ脱水塔で水分を除去しておきます。脱水塔は異なる温度域で間欠運転されるため、多くは疲労設計が考慮されています。

d) 水銀除去装置で水銀を除去

冷却プロセスで用いられる熱交換器にはアルミニウム材が用いられることが多く、プロセス流体に水銀が含まれていると、この熱交換器を腐食することから、水銀除去装置でこれを除去します。

e) 蒸留塔でメタン、エタン、プロパンなどを分留

供給ガスには天然ガスの主成分のメタン以外にも、エタン、プロパン、ブタンなど、重質の炭化水素が含まれています。これらの重質分の一部は後述 g) のプロセスの冷媒として使用される他、重質分自体にも商用価値があるため、供給ガスの成分に応じてメタンやその他の重質分を蒸留して分離します。

この蒸留プロセス以降の機器の材料はプロセス自体が極低温となる、もしくは運転停止の脱圧時に極低温となります。

f) メイン熱交換機で冷却、液化

蒸留されたメタンを主成分とするガスをメイン熱交換器で冷却、液化して LNG とした後、LNG は出荷されるまで LNG タンクで貯蔵されます。LNG は常圧下の沸点が約 $-162^{\circ}\text{C}$ の極低温であるため、メイン熱交換器の素材には低温じん性と経済性双方の観点からアルミニウム材が採用されています。このメイン熱交換器は通常、プロセスライセンサーの供給範囲に入っており、その場合、設計、製作もプロセスライセンサーにて多く行われます。設計詳細や製作情報は社外への開示が制限されており、メイン熱交換器の構造については殆ど知られていません。

g) 以上の b)~f) のガス処理以外の主要プロセスとして、f) ガス冷却プロセスの冷媒側の冷却プロセスがあります。プロセスライセンサー各社が様々な冷却プロセスを商用化していますが、LNG 年間生産量 500 万トンクラスの場合、混合冷媒プロセスと、カスケードプロセスが二大勢力となっています。混合冷媒プロセスはプロパン冷媒とエタンやプロパンの混合冷媒の二種類の冷媒を用いています。プロパン冷媒で冷やした供給ガスを、メイン熱交換機の混合冷媒で冷却して液化を行い

ます。混合冷媒は、供給ガスの液化冷却以外にもプロパン冷媒の冷却にも用いられます。一方、カスケードプロセスではプロパン、エチレン、メタンの三種の冷媒で段階的にガスを冷却します。冷却プロセスの選定にあたっては、実績や、生産規模、ユーティリティー条件などの様々な条件が加味されます。

いずれのプロセスでも冷媒の冷却方法は一般家庭用のエアコンと同様の仕組みで、冷媒を大型圧縮機で断熱圧縮した状態で各種熱交換器にて冷却した後、断熱膨張させることで低温の冷媒を得ています。このプロセス中の主な圧力容器は冷却用のエアフィンクーラーや大型圧縮機用の吸い込みドラムです。

LNG プラント構成機器の特徴として、上流側（上記 a)～d)）は供給ガス中の不要物を除去するプロセスで、供給ガス中の腐食性物質やアミン溶液による腐食を考慮した機器構成が必要になり、下流側（上記 e)～f)）は供給ガスを冷却し、分離、液化を行うため、多くの部分が極低温の設計条件となり、オーステナイト系ステンレス鋼製機器を採用することが一般的となっています。このことから、上流側 a)～d)をホットセクション、下流側 e)～f)をコールドセクションと呼び区別することがあります。

これまで LNG プラントの 1 トレイン（系列）あたりの生産能力は 1960 年代の 1.0MTA(100 万 t/年)から 2000 年代の 7.8MTA までとスケールメリットによるコストダウンを追及して技術の進歩に伴い大規模化してきました。しかし、近年では運転に柔軟性を持たせたいことなどから、大規模化の傾向が弱くなってきています。さらに、船舶、列車や小型発電設備への LNG 燃料普及の動きに合わせて、標準化した小型分散型液化設備の需要の伸びも予想されています。又、規模だけでなく、プラントの種類も多様化してきており、建設コストは割高だが転用可能で柔軟性がある浮体式 LNG プラント（フローティング LNG）の建設も始まっています。このように、現在では、LNG プラントの規模や様式はその使用目的に合わせて様々に多様化、細分化する傾向にあります。

## 参考文献

- 1) 稲垣道夫・小野寺真作・安達振作共著「圧力容器鋼材溶接の実際」1986 年、産報出版
- 2) 圧力設備診断技術者レベル 1 講習テキスト（改訂 8 版）1916 年、(一社)日本高圧力技術協会
- 3) 経済産業省 作成資料
- 4) グラフで見る日本の化学工業 2017／社団法人日本化学工業協会
- 5) 腐食防食ハンドブック／社団法人腐食防食協会
- 6) 石油精製装置の材料選定に関する資料／社団法人石油学会 装置部会・設備保全分科会 材料専門委員会
- 7) 「平成 28 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2017）第 2 章第 1 節、2 節
- 8) 日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす, Vol.96, No. 5, 2017
- 9) 千代田化工建設ホームページから抜粋

<略歴>

**田原 隆康 (たはら たかやす)**

---

- 1964年 芝浦工業大学 機械工学科 卒業  
1964年 株式会社日本製鋼所 入社 室蘭製作所 配属  
1990年 同 東京本社  
1998年 博士(工学) 取得  
1999年 (社)日本高圧力技術協会 特別研究員  
2003年 石油連盟 技術環境安全部技術アドバイザー  
2009年 ASME Fellow 取得  
2013年 株式会社セイコーウェーブ 圧力設備技術顧問  
2018年 API 30 Years Service Award 授与  
現在に至る