

# 「化学プラント(設計編)」\*

坂田 幹宏\*\*, 木曾 朋顕\*\*



坂田 幹宏



木曾 朋顕

Chemical Plant (Design)\*

by SAKATA Mikihiro\*\*, KISO Tomoaki\*\*

**キーワード** エチレンプラント, 分解炉, 分解管, ASME Code, 継手効率, 継手強度低減係数, PWHT, 異材溶接, 浸炭, アルカリ応力腐食割れ

## 1. はじめに

2010年頃から米国で始まったシェール革命を契機にシェールガス (Shale Gas) の採掘量は増加の一途をたどっており<sup>1,2)</sup>, 今後は米国外でも開発が進むと予想されている<sup>3)</sup>.

シェールガスからメタン (Methane) を主成分とする天然ガス (Natural Gas) を気体として分離する際, NGL (Natural Gas Liquid) とよばれるメタンよりも重質な炭化水素群が得られる. NGLには多くのエタン (Ethane) が含まれるため, 米国ではシェールガスの増産に伴い, 付随して得られるエタンの生産量も増加している. 天然ガスが発電燃料としての需要を伸ばす一方で, エタンはエチレン原料以外に用途がなく供給過剰となっている<sup>4)</sup>. このような背景から安価で豊富に入手できるようになったエタンは, これを原料とするエチレンプラントのブーミングを生み, 米国では2014年から2018年までの累計で年産 10MM ton を超えるエチレンプラントの増強計画が公表されている<sup>5-13)</sup>. これらの一部を表1にまとめる.

表1 U.S. Ethylene Cracking Capacity Expansions

| Estimated Completion Data | Plant Capacity (1,000 t/y) | Location   | Company           |
|---------------------------|----------------------------|------------|-------------------|
| 2016 ~                    | 1,500                      | Gulf Coast | ExxonMobil        |
| 2017                      | 1,500                      | Gulf Coast | Dow Chemical      |
| 2017                      | 1,500                      | Gulf Coast | Chevron Phillips  |
| 2017 ~                    | 1,300                      | Northeast  | Shell             |
| 2017                      | 800                        | Gulf Coast | Formosa Plastics  |
| 2017 ~                    | 1,500                      | Gulf Coast | Sasol             |
| 2017 ~                    | 550                        | Gulf Coast | Oxy Chemical      |
| 2017 ~                    | 1,000                      | Gulf Coast | Braskem           |
| 2018                      | 1,300                      | NA*        | Indorama Ventures |

\* Not Announced

\*原稿受付 平成26年7月11日

\*\*正員 日揮(株) Member, JGC Corporation

エタノール (Ethanol), エチレングリコール (Ethylene Glycol) やポリエチレン (Polyethylene) などの化学製品はエチレン (Ethylene) を基礎原料として製造されるため, エチレンプラントは石油化学工業における主幹プロセスとして位置づけられる. 本稿では, エタンを原料としたエチレンプラントの設計について解説する.

## 2. 製品概要

図1にエチレンプラントの全景を示す. また, 図2にエタンを原料としたエチレンプラントのプロセスフローを示す. エチレンプラントは大きく分けて, 分解 (Cracking), 急冷 (Quenching), 昇圧・洗浄 (Compression and Caustic Wash), 分留 (Separation) の4工程から構成される. 以下, これらの概要を紹介する<sup>14-18)</sup>.

### 2.1 分解 (Cracking)

天然ガス処理設備で精製されたエタンを主成分とするフィードガス (Feed Gas) は, パイプラインを通してエ



図1 Ethylene Plant

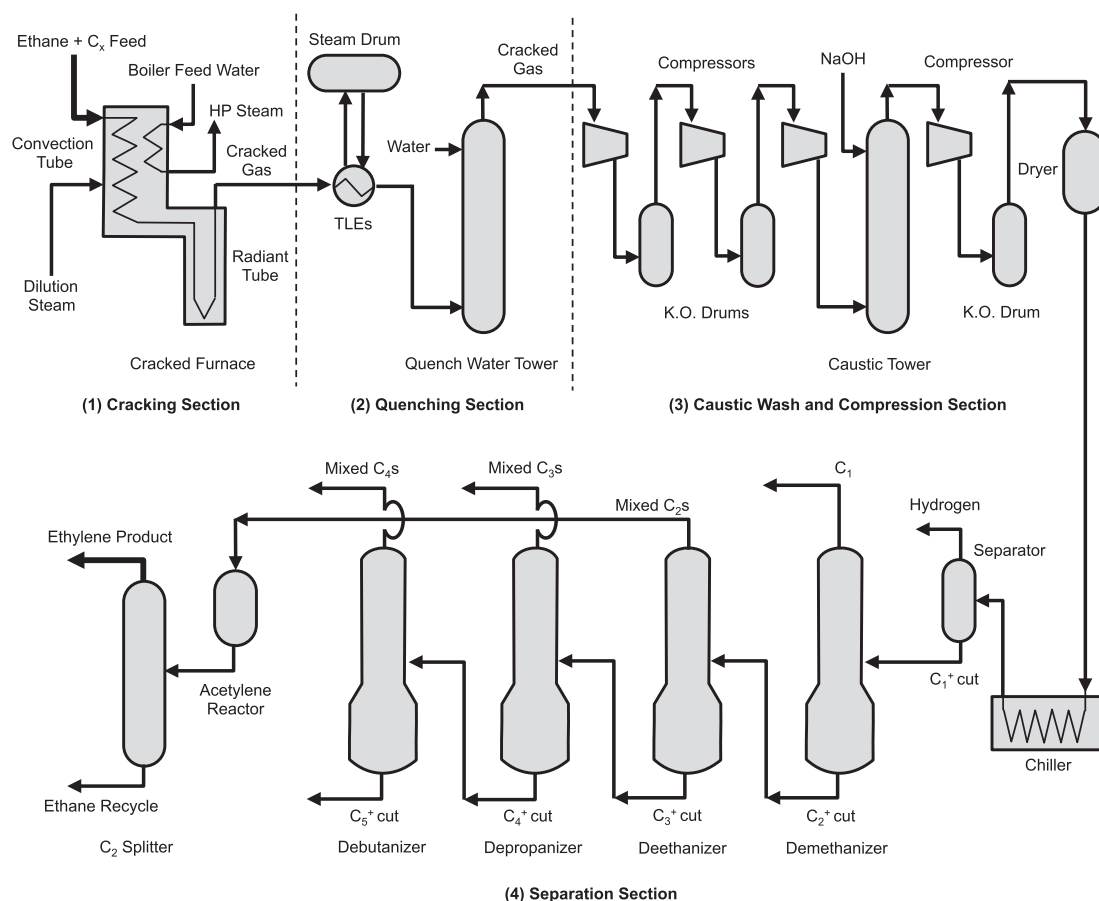
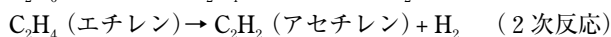
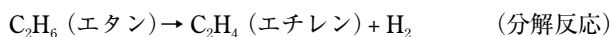


図2 Ethylene Production Overview

チレンプラントへと運ばれる。この時点でフィードガス中のエタン濃度は90%程度であり、メタン、プロパン(Propane)、ブタン(Butane)といったエタン以外の炭化水素に加え水、二酸化炭素などの不純物が含まれる。フィードガスは分解炉(Cracking Furnace)の対流管(Convection Tube)を通して希釈スチーム(Dilution Steam)と共に500-700℃に予熱された後、輻射管(Radiant Tube)を通して750-850℃に加熱され熱分解(Thermal Cracking)される。輻射管は熱分解が行われることから、一般に分解管(Cracking Tube)と呼ばれる。

エタンの熱分解によりエチレンを得る反応は以下の通りである。熱分解と同時に起こる2次反応を抑制するため、分解温度における滞留時間は0.1-0.5秒になるよう設計されている。



エタンの熱分解はスチームクラッキング(Steam Cracking)と呼ばれ、スチームの添加を必要とする。その目的は炭化水素の分圧を下げることで分解反応を促進すること、また、更なる熱分解によって炭素が生成し、これが管壁で析出するコーキング(Coking)と呼ばれる現象が生じるのを防ぐためである。添加するスチーム量は重量比でエタン原料の3割に達する。

分解炉は、エタンの熱分解とは別に、後の昇圧工程で使用するコンプレッサーの動力源となる高圧スチーム(HP Steam)を供給する役割も担う。

## 2.2 急冷 (Quenching)

分解炉を出たガス(Cracked Gas)はTLE(Transfer Line Exchanger)と呼ばれるシェルアンドチューブタイプ(Shell and Tube Type)またはダブルチューブタイプ(Double Tube Type)の間接式熱交換器を通してスチームとの熱交換により200℃まで急冷される。更に、急冷塔(Quench Water Tower)と呼ばれる直接水冷装置で40℃まで冷却される。エチレンの生成プロセスにおいて急冷が必要となるのは、高温における平衡組成を即座に低温に持ちこし、エチレンの収率を高めるためである。

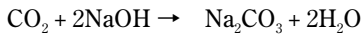
急冷塔では直接水冷と同時に気液分離が行われ、分解ガスは塔頂から、重質な炭化水素を含む凝縮水は塔の底部から取り除かれる。

## 2.3 昇圧・洗浄 (Compression and Caustic Wash)

急冷塔を出た分解ガスには、熱分解で得られたエチレンと2次反応により生じたアセチレン(Acetylene)の他に、未反応のエタン、フィードガス中に含まれていたその他の炭化水素が残存している。この分解ガスは、複数のコンプレッサーを通して昇圧され、脱水された後、下流の分留工程において軽質なものを順次気体として分離されることになる。急冷塔出口の分解ガスの圧力は、約1 bargであるが、最終ステージのコンプレッサー出口では約35 bargまで昇圧されている。

分解ガスには炭化水素の他にフィードガスに含まれていた二酸化炭素とコーキングの防止を目的として添加される硫黄化合物(DMDS: Dimethyl Disulfide)に由来する

硫化水素 (H<sub>2</sub>S) が含まれる。これらの酸性ガスはコンプレッサー間に配置された苛性ソーダ洗浄塔 (Caustic Tower) とよばれる設備を通して除去される。洗浄塔内で生じる反応は以下の通りである。



#### 2.4 分留 (Separation)

最終ステージのコンプレッサーを出た分解ガスは、圧力をほぼ維持したまま熱交換器を通して -160℃ まで冷却され、まず初めに水素が気体として分離される。その後、脱メタン塔 (demethanizer)、脱エタン塔 (Deethanizer)、脱プロパン塔 (Depropanizer)、脱ブタン塔 (Debutanizer) を通して、軽質な炭化水素から順に分離される。脱エタン塔を出た C<sub>2</sub>炭化水素には2次反応で生じたアセチレンが含まれる。アセチレンはアセチレンリアクターを通してエタンまたはエチレンに還元される。エタンとエチレンの混合ガスはエチレン精留塔 (Ethylene Splitter) を通してエタンとエチレンに分離される。実際のプラントでは、フィードガスの組成に応じてこれら分留塔の前後関係が入れ替わる。

### 3. 溶接構造物としての設計思想

ここではエチレンプラントの心臓部ともいえる分解管の設計と、その他の圧力設備 (機器/配管等) に適用される ASME B31.1<sup>19)</sup>, ASME B31.3<sup>20)</sup>, ASME Section I<sup>21)</sup>, ASME Section VIII Division 1<sup>22)</sup> について溶接に関連する項目をいくつか紹介する。

#### 3.1 分解管

分解管は炉内に設置されたバーナーからの輻射熱により外側から加熱され、内部の流体が 850℃ まで昇温されるよう設計されている。この時、分解管のメタル温度は 1000℃ を超えるため、クリープや浸炭、さらには、起動・停止時の温度変化に起因した熱疲労が生じる。一方、分解管の内圧は 1 bar 程度と低いため、ASME 等の Code が適用されず、分解炉には材料メーカーが独自に開発した材料が適用される。現在では、HP 系耐熱合金と呼ばれる 25Cr-35Ni 合金をはじめとした Cr-Ni 系オーステナイト合金が広く使用されており、管壁から流体への熱伝達等を考慮して、図 3<sup>23)</sup> に示すような管内に突起を設けた分解管も実用化されている。分解管はバンド管やエルボ管を介して溶接によって図 4<sup>24)</sup> に示すような縦型のコイルに組立てられる。さらに、コイルにはラグ (Lug) やサポートジグ (Support Jig) が溶接によって取り付けられ、コイルはこれらを介して炉内に固定される。

#### 3.2 溶接に関する ASME Code の規定

##### 3.2.1 継手効率 (Joint Efficiency / Quality)

継手効率とは母材の強度を 1 とした場合の継手強度を示す。B31.1, B31.3, Sec. I 及び Sec. VIII Div. 1 では継手効率は “Joint Efficiency” または “Joint Quality” として定義されている。溶接部に対して放射線透過試験 (RT: Radiographic Test) または超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Test) を実施しない場合、継手効率として 1 より小さい値が与えられており、溶接線の全線または一部

に対して RT または UT を実施することで 1 または 1 に近い値が採用できるようになる。これらの規定の一例を表 2 に示す。

##### 3.2.2 継手強度低減係数 (Weld Joint Strength Reduction Factor)

継手強度低減係数とは母材のクリープ強度を 1 とした場合の溶接継手のクリープ強度を示す。ASME Code で与えられている許容応力は圧延材、鍛造材など素材のクリープ強度をもとに設定されており、溶接継手としてのクリープ強度は考慮されていない。2000年頃より Cr-Mo 鋼の溶接継手の熱影響部細粒域のクリープ強度低下が広く知られるようになり<sup>25, 26)</sup>、これをきっかけに、他の鋼種も含めて継手強度低減係数として ASEM 31.1, B31.3 及び Section I に導入された。これらの一例を表 3 に示す。管の長手溶接など、板厚の計算において溶接部を考慮する必要がある場合で、設計温度がクリープ温度域に入る時は、継手強度低減係数を考慮する必要がある。

同じ現象が想定されるにも関わらず、Sec. VIII Div. 1 において継手強度低減係数は考慮されていない。



図3 Cracking Tubes with Internal Fins<sup>23)</sup>



図4 Coils of Cracking Tubes<sup>24)</sup>

表2 Joint Efficiency / Quality

| ASME Code               | Joint Type  | Examination | Joint Efficiency / Quality |
|-------------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| B31.1 / B31.3           | Single BW*  | Spot        | 0.85                       |
| Section I (Pipes and    | Single BW*  | Spot        | 0.85                       |
|                         |             | 100%        | 1.00                       |
| Section VIII Division 1 | Double BW** | Non         | 0.70                       |
|                         |             | Spot        | 0.85                       |
|                         |             | 100%        | 1.00                       |

\* Single BW: Single sided butt weld

\*\* Double BW: Double sided butt weld

表3 Weld Joint Strength Reduction Factor

| ASME Code                | Steel Grade   | Temperature, °C |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------|---------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                          |               | 427             | 454  | 482  | 510  | 538  | 566  | 593  | 621  | 649  | 677  | 704  | 732  | 760  | 788  | 816  |
| B31.1 / B31.3, Section I | 1.25Cr-0.5Mo  | 1.00            | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 | 0.73 | 0.68 | 0.64 | ---  | ---  | ---  | ---  | ---  |      |
|                          | 2.25Cr-1Mo    | 1.00            | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 | 0.73 | 0.68 | 0.64 | ---  | ---  | ---  | ---  | ---  |      |
|                          | Mod. 9Cr-1Mo  | ---             | ---  | ---  | 1.00 | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 | ---  | ---  | ---  | ---  | ---  |      |
|                          | Austenitic SS | ---             | ---  | ---  | 1.00 | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 | 0.73 | 0.68 | 0.64 | 0.59 | 0.55 | 0.50 |
|                          | Alloy 800H/HT | ---             | ---  | ---  | 1.00 | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 | 0.73 | 0.68 | 0.64 | 0.59 | 0.55 | 0.50 |

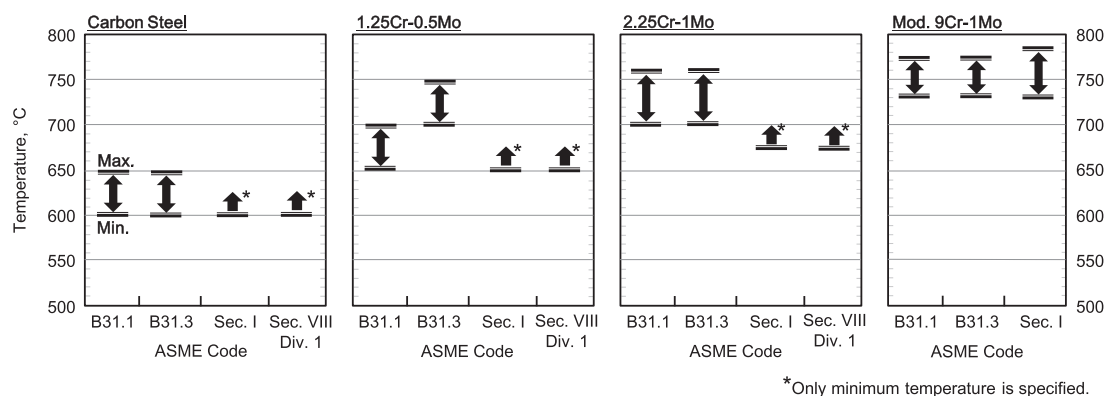


図5 Postweld Heat Treatment, Temperature Range

### 3.2.3 溶接後熱処理 (PWHT: Postweld Heat Treatment)

溶接後熱処理 (PWHT) は溶接残留応力の低減や金属組織の改善を目的として行われる。ASME Code では PWHT 温度は鋼種にもとづいて、時間は板厚にもとづいて規定される。

B31.1, B31.3, Sec. I 及び Sec. VIII Div. 1 の PWHT 温度規定を図5に示す。PWHT 温度範囲は ASME Code 間で異なっているおり、1.25Cr-0.5Mo 鋼, 2.25Cr-1Mo 鋼の PWHT 温度は Code 間の差が大きい。特に、B31.3 は 1.25Cr-0.5Mo 鋼と 2.25Cr-1Mo 鋼の両方に対して 700°C を超える温度範囲での PWHT を要求しており、素材の焼戻し温度 (Tempering Temperature) 域と重なる場合がある。最近のプロジェクトでは、PWHT 温度より素材の焼戻し温度が高くなるように、PWHT 温度と焼戻し温度の差  $\Delta T$  を具体的に規定した仕様も見受けられるようになっている。PWHT 時間についても、1 hr/in. を基本として設定されているものの、PWHT が要求される板厚の下限、PWHT 時間の下限などが ASME Code 間で異なっている。

ASME Code では一般にオーステナイト系の合金に対して PWHT は要求されないが、使用環境によっては特別に要求される場合もある。例えば、Alloy 800 系の Ni-Cr-Fe 合金は高温で長時間使用された場合に溶接部で粒界割れを生じることが知られており<sup>27, 28)</sup>、これを予防する目的で、Section VIII Div. 1 では設計温度が 538°C を超える耐圧部材に対して、PWHT または溶接後の溶体化処理が要求されている。一方、B31.1, B31.3 及び Section I においては、このような脆化に対して溶接後の溶体化処理が効果的であることが継手強度低減係数に関する注記として明記されているのみで、溶接後熱処理または溶体化処理が要求されているわけではない。実際のプラントの設計においては、ユーザやプロセスライセンスの要求にも

とづいて PWHT の要否や温度・時間条件が規定される場合もある。

## 4. 溶接継手の特徴と要求性能

エチレンプラントで使用される主な材料を表4にまとめる。低温側はマイナス 45°C まで炭素鋼、それより低温側は Type 304 ステンレス鋼の 2 鋼種でおおよそ対応が可能であるが、高温側は Cr-Mo 鋼, Type304H, Alloy800 H など様々な材料が適用される。特に、分解管には 25Cr-35Ni 合金, 35Cr-45Ni 合金といった特殊合金が適用される。分解炉全体で見るとプロセス温度に応じて段階的に材料が切替わるため、異材溶接が多用される。また、下流の苛性ソーダ洗浄塔ではアルカリ応腐食割れ (Caustic Stress Corrosion Cracking) への対応が求められる。

### 4.1 分解管の溶接

分解管では、管壁のメタル温度が 1000°C を超えるため、コーキングにより管壁に堆積した炭素がメタル中に拡散する浸炭と呼ばれる現象が生じることが知られている<sup>29-32)</sup>。浸炭は表面の酸化物スケールの崩壊を起点して進行するため、分解管には高温で保護性の高い酸化被膜を形成する目的で Si や Ti, Al など耐酸化元素を添加した 25Cr-35Ni 合金, 35Cr-45Ni 合金が適用される。

これらの合金は完全オーステナイト系であり、耐酸化性の他にクリープ強度の観点から C, Nb を多く含み、これらの元素のバランスによっては高温割れ感受性が高くなることが知られている<sup>33)</sup>。

溶接には母材の組成に合わせた共金系の溶接材料が適用されるが、AWS に規格が整備されておらず、EN 規格品や無規格品が使用され、品質の観点から全層ティグ溶接 (Tungsten Inert Gas Arc Welding) またはプラズマアーク溶接 (Plasma Arc Welding) が適用され、先の高温割れの観点から低入熱で施工される。

表4 Typical Materials Selection for Ethylene Plant

| Section                      | Equipment                | Typical Design Temperature |                              | Material                   |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|                              |                          |                            |                              |                            |
| Cracking                     | Convection Tube / Piping | up to 420°C                |                              | Carbon Steel               |
|                              |                          | 350 ~ 450 °C               |                              | 1.25Cr-0.5Mo               |
|                              |                          | 450 ~ 550°C                |                              | 2.25Cr-1Mo<br>Mod. 9Cr-1Mo |
|                              |                          | 500 ~ 750°C                |                              | Type 304H<br>Type 347H     |
|                              |                          | 750 ~ 850°C                |                              | Alloy 800H/HT              |
|                              |                          | Crossover Line             | 700 ~ 750°C                  | Type 304H<br>Type 347H     |
|                              |                          | Radiant Tube               | 800 ~ 1000°C<br>900 ~ 1100°C | 25Cr-35Ni<br>35Cr-45Ni     |
| Quench                       | Transfer Line            | 800 ~ 950°C                | 20Cr-32Ni LC                 |                            |
|                              | Transfer Line Exchanger  | 350 ~ 450°C                | 1.25Cr-0.5Mo                 |                            |
|                              |                          | 400 ~ 550°C                | 2.25Cr-1Mo                   |                            |
|                              | Steam Drum               | 750 ~ 850°C                | Alloy 800H/HT                |                            |
| Caustic Wash and Compression | Quench Water Tower       | 300 ~ 400°C                | Carbon Steel                 |                            |
|                              | Caustic Tower            | down to -20°C              | Carbon Steel                 |                            |
|                              | Compressor               | down to -45°C              | Carbon Steel                 |                            |
| Separation                   | Chiller                  | down to -170°C             | Aluminum                     |                            |
|                              | Demethanizer             | down to -120°C             | Type 304                     |                            |
|                              | Depropanizer             | down to -20°C              | Carbon Steel                 |                            |
|                              | Debutanizer              | down to -20°C              | Carbon Steel                 |                            |
|                              | Deethanizer              | down to -45°C              | Carbon Steel                 |                            |
|                              | C2 Splitter              | down to -60°C              | Type 304                     |                            |

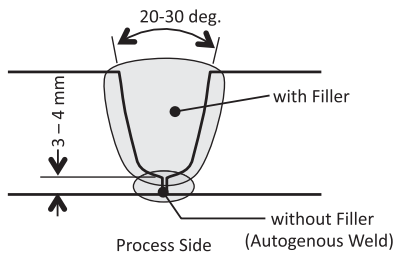


図6 Groove Preparation for But Weld Joint of Cracking Tube

表5 Example of Welding Consumables Application for Dissimilar Weld Joint

| Joint   | Parent Metal   | AWS Classification     |
|---------|----------------|------------------------|
|         | Combination    | GTAW + SMAW            |
| DW-1, 2 | Carbon Steel   | A5.18 ER70S            |
|         | / 1.25Cr-0.5Mo | + A 5.1 E70XX          |
| DW-3    | 1.25Cr-0.5Mo   | A5.14 ERNiCr-3         |
|         | / Type 304H    | + A5.11 ENiCrFe-3      |
| DW-4, 5 | Type 304H      | A5.14 ERNiCrCoMo-1     |
|         | / Alloy 800H   |                        |
| DW-6    | Type 304H      | + A5.11 ENiCrCoMo-1    |
|         | / 25Cr-35Ni    |                        |
| DW-7    | 25Cr-35Ni      | 25Cr-35Ni Filler Metal |
|         | / 35Cr-45Ni    |                        |

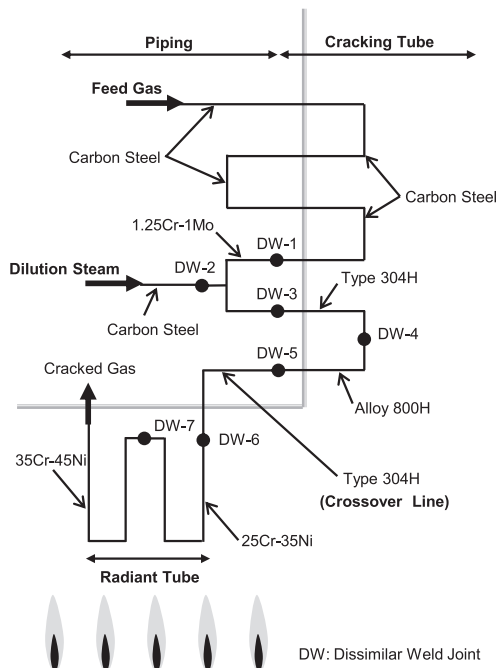


図7 Typical Materials Selection of Cracking Furnace Process Line

分解管の突合せ溶接においては、図6に示す形状の開先を適用し、初層を溶加材なしで溶接する（Autogenous Weld）場合が多い。これは、溶加材に母材と同等レベルのSiやTi, Alなど耐酸化元素を添加するのは溶接性の観点からが難しく、溶加材を適用することで母材の組成的特徴が失われるのを避けるためである。

4.2 分解炉まわりの異材溶接

異材溶接継手における溶接材料の選定は、ASME Codeに規定があるわけではなく、一般にA PI RP 582<sup>24)</sup>などのIndustrial Standardにもとづいて行われる。分解炉で使用される材料の組合せの一例を図7に、異材溶接継手DW-1~7における溶接材料の選定例を表5に示す。対流管の出口から分解管の入口へと通じる配管（クロスオーバーライン）のメタル温度は700°Cを超えるため、Type 304H, Type 347H ステンレス鋼や Alloy 800系のNi-Cr-Fe合金が適用される。これらの異材溶接について先のAPI RP 582では、760°CまでAlloy 82系の溶接材料を推奨しているが、プロセスライセンサーによっては、温度によらずクリープ強度に優れたAlloy 617系の溶接材料の適用が要求される場合もある。

### 4.3 アルカリ応腐食割れ (Caustic Stress Corrosion Cracking)

分解炉を出たガスには原料中に含まれていた CO<sub>2</sub>の他にコーキングの防止を目的として添加される硫黄化合物に由来する硫化水素が少量含まれる。これら酸性ガス成分の除去を行う苛性ソーダ洗浄塔には通常炭素鋼が適用されるが、苛性ソーダ環境中では炭素鋼の溶接部でアルカリ応腐食割れ (Caustic Stress Corrosion Cracking) が生じることが知られている<sup>29)</sup>。NACE SP0403<sup>35)</sup>において、苛性ソーダによるアルカリ応腐食割れ対策として炭素鋼の溶接部に対する PWHT が推奨されており、洗浄塔とその配管には PWHT が要求される。図 5 に示したように ASME Code において炭素鋼の PWHT 温度の下限は 600°C であるが、NACE SP0403 ではやや高めめの 635°C での PWHT が要求されている。

## 5. おわりに

2018年までに米国で予定されているエチレンプラントの新・増設規模は年産 10 MM ton に上る。これら計画のほとんどがテキサス州とルイジアナ州にまたがる Gulf Coast に位置しており、今後、同地区においては、その他の石油化学プラントを含め複数のプラントの建設が同時並行で進むと予想される。2015年には Gulf Coast において累計 90,000 人の労働者が必要になると予想されており、溶接工だけでも数千人規模に上る。このため、同国でのプラント建設においては溶接工の確保が難しい状況となっており、賃金の高騰が進んでいる<sup>36), 37)</sup>。今後は、工期短縮や建設コスト低減の観点から、溶接の高能率化に対するニーズがこれまで以上に高くなると考えられ、更にはモジュール工法 (プラントを数十のブロックに分け事前に建設地の外で組み立てて輸送し建設地で最終組み立てを行う手法) の適用も進むと予想される。

## 参考文献

- 1) 野神 隆之: シェールガス革命は世界天然ガス市場に何をもたらしたのか, その一考察, 石油・天然ガスレビュー, Vol. 47-5 (2013)
- 2) American Chemistry Council: Shale Gas, Competitiveness, and New US Chemical Industry Investment: An Analysis Based on Announced Projects (2013)
- 3) 化学工業日報: シェール革命 米国外への拡大加速, (2014年06月20日 朝刊)
- 4) 化学工業日報: 米エタン価格, 天然ガス下回る (2014年05月12日 朝刊)
- 5) Benardo Fallas and Pavel Pavlov: Time to get cracking, Platts Special Report: Petrochemicals (2013)
- 6) Dow Chemical (<http://www.dow.com>): Press Releases, Dow Announces Plans to Fully Integrate and Grow North American Performance Businesses with Shale Gas Liquids (Apr 21, 2011)
- 7) Hydrocarbon Processing (<http://www.hydrocarbonprocessing.com>): Article, OxyChem, Mexichem target early 2017 for startup of new Texas cracker (Feb 06, 2013)
- 8) Hydrocarbon Processing (<http://www.hydrocarbonprocessing.com>): Article, 2014 global construction outlook-Part 1 (Mar 01, 2014)
- 9) Taipei Times (<http://www.taipeitimes.com>): News, Formosa

- Plastics mulls US factory (Jan 15, 2014)
- 10) Sasol (<http://www.sasol.com>): Media Release, Sasol Advances U.S. Ethane Cracker and Derivatives Project with Appointment of Key Engineering and Technology Providers (July 15, 2013)
- 11) Braskem (<http://www.braskem.com.br>): News, Ethylene XXI Project (Sep 30, 2011)
- 12) ICIS (<http://www.icis.com>): INSIGHT: Indorama joins US ethylene fray (Mar 12, 2012)
- 13) ICIS (<http://www.icis.com>): News, ExxonMobil brings total US C2 expansions to over 33% of capacity (Jun 01, 2014)
- 14) 石油学会: 石油化学プロセス, 講談社 (2001)
- 15) Alain Chauvel and Gilles Lefebvre: Petrochemical Processes, Editions Technip (1989)
- 16) Heinz Zimmermann and Roland Walz: Ethylene, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 13, Wiley-VCH (2009)
- 17) SIEMENS: Process Analytics in Ethylene Production Plants, Case Study (2007)
- 18) Technip: Deep Energy Arctic Technologies CRYOMAX® Ethylene, Tomorrow, A Technip Technology Publication - Issue 4 (2014)
- 19) ASME B31.1-2012, Power Piping
- 20) ASME B31.3-2012, Process Piping
- 21) 2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Rules for Construction of Pressure vessels Division 1
- 22) 2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section I Rules for Construction of Power Boilers
- 23) Manoir Industries's Brochure: Latest Alloys Development
- 24) Kubota Steel Casing's Home Page (<http://caststeel.kubota.co.jp>)
- 25) K Bell: Elevated temperature midlife weldment cracking (Type IV) - a review, TWI Industrial Member Report, No. 597 (1997)
- 26) Hiromichi Hongo, Masaaki Tabuchi and Yukio Takahashi: Microstructures and Type-IV Creep Damage of High Cr Steel Welds, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 3-3 (2009)
- 27) L.E. Shoemaker, G.D. Smith, B.A. Baker and J.M. Poole: Fabricating Nickel Alloys to Avoid Stress Relaxation Cracking, NACE CORROSION 2007, Paper No. 07421 (2007)
- 28) H. Van Wortel: Control of Relaxation Cracking in Austenitic High Temperature Components, NACE CORROSION 2007, Paper No. 07423 (2007)
- 29) API RP 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry (2011)
- 30) 西山 佳孝: 浸炭性ガスにおける金属材料のメタルダスティング, Zairyo-to-Kankyo, Vol. 56-3 (2007)
- 31) Jeffrey Xie, Lorrie Davies, David Eisenhawer, Randy Saunders and Les Benum: Metal dusting in the Crossover Piping System at Petrochemical Plant, NACE C2012-0001149 (2012)
- 32) 藤原 正人, 山本 真人, 岡田 浩一, 大矢 耕二: 小特集 分解炉チューブコーキング防止技術, 配管技術, Vol. 46-10 (2004)
- 33) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会: スーパーアロイの溶接, 産報出版 (2010)
- 34) API RP 582: Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries (2009)
- 35) NACE SP0403: Avoiding Caustic Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel Refinery Equipment and Piping (2008)
- 36) Houston Business Journal (<http://www.bizjournals.com/houston/>): News, More welding services moving to Houston for energy boom (Apr 09, 2104)
- 37) HIS Chemical Week (<http://www.chemweek.com>): Chemweek's Lab, Engineering & construction: Shale boom reinvigorates the industry, could lead to shortage of labor resources (Jun 10, 2013)