

(解説)

リアクタ世界一への挑戦とリアクタにかかわる最近の動向

能勢士郎*・山田雅人*・深田利昭**・酒井忠迪(工博)**・高野正義(工博)***・後藤明信****

*都市環境・エンジニアリングカンパニー・機器技術部 **神鋼検査サービス㈱ ***鋼コベルコ科研 ****溶接カンパニー・技術開発部

Big Strides to a World Leading Heavy Wall Pressure Vessel Manufacturer

Shiro Nose・Masato Yamada・Toshiaki Fukada・Dr. Tadamichi Sakai・Dr. Masayoshi Kohno・Akinobu Goto

In the 1970s, Kobe Steel lagged behind the competition in the heavy wall reactor manufacturing field, due to insufficient facilities and knowledge. However, as a result of sustained and highly successful efforts over the past two decades, Kobe Steel became the world's leading manufacturer of heavy wall reactors for oil refineries in late 1990s. Today, Kobe Steel is the only company in the world capable of producing everything required for the manufacture of heavy wall reactors, including the base metals and welding materials. This paper discusses the company's past achievement and its future plans in this area.

まえがき = 1970 年台初頭、依然として高度成長が続いていたわが国では、硫黄分を多く含む中東からの原油を原料とした重油が発電などのエネルギー産業や船舶の燃料に主にもちいられていた。燃焼した硫黄が大気汚染の主要原因となったことから、重油中の硫黄分を減少(例、3% 0.3%)させることが急務となった。いっぽう、欧米、とくに米国では価値の低い重油を分解することにより、付加価値の高い車両や航空機のための輸送用ガソリン・灯油・軽油(以下白油と呼ぶ)の増産が必要となった。

これら脱硫と重油分解の二つの目的を個別にあるいは同時に達成する効率的な手段として、重油中の硫黄を直接取出して回収する重油直接脱硫プラントと重油中の分子量の大きな化学成分をより小さな分子量の化学成分(白油)に分解する水素化分解プラントの増設が日本をふくむ世界各地の製油所で相次いだ。これらのプラントの心臓部にあつて必要な反応をつかさどる反応器がリアクタと呼ばれるものであり、高温高压条件のもとで原料の重油と水素ガスを触媒を使って反応させることにより脱硫や分解の目的を達成するものである。

当時、当社はアンモニア合成塔を主とする多層容器を主に製作していたが、その需要の先細りが予想されていたので、より将来にわたり高い需要が予想された単肉リアクタの市場に乗り出す必要があった。ところが必要とされるリアクタは肉厚が 200 mm を超えるほど厚く、重量も数百トンを超える重量級が普通であった。当時このようなリアクタを製作することができたのは、鍛鋼製のリングを円筒胴にもちいて圧倒的なシェアを誇った日本国内の先発メーカーと厚肉鋼板を溶接して原子炉压力容器を製作していた米国の一部の大手製缶メーカーに限られていた。いっぽう、当時の当社の設備と技術力ではどのような方法で製作しても顧客の仕様を満足できる製品を製作することができず、技術と価格の両面で競争力のあるリアクタが製作できるようになることは社内関係者の共通した課題であった。

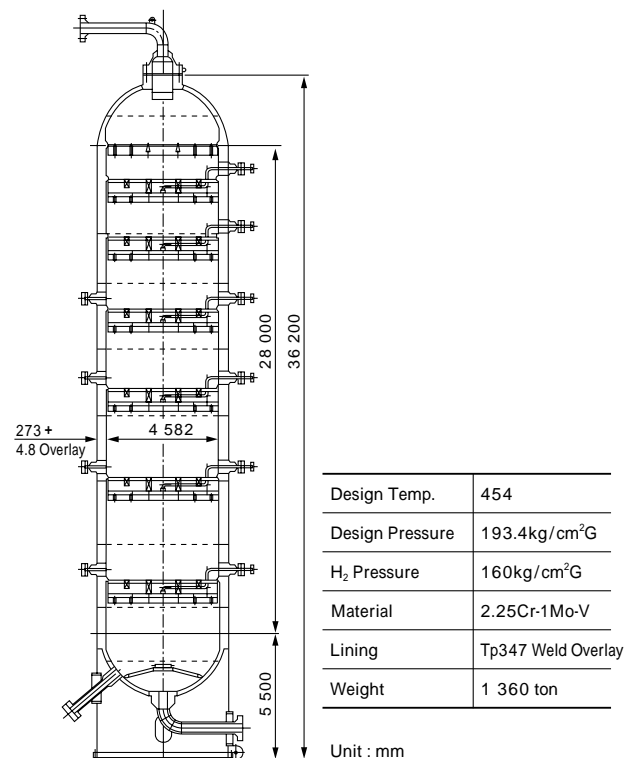
このような状況のもとで、1975 年に当社高砂製作所に世界最大級の水圧式自由鍛造プレスを含む大型鋳鍛鋼

品の一貫製造設備が完成したことを機会に、全社横断的なリアクタ関係の各種技術開発をおこないリアクタの上市を果たした。近年ではリアクタの製造量などの面で世界一を記録するに至った。リアクタの最近の動向とともにその経緯をここに報告する。

1. リアクタの構造

1.1 リアクタの構造と仕様

代表的なリアクタの構造と仕様を第 1 図に示す。リアクタには触媒床が不可欠で、その使われ方から固定床と流動床の二種類がある。主流は第 1 図に示されるような固定床方式であり、一定の形状をもった粒状の触媒がリアクタのなかで一つ以上の固定した層として充填される。原料の重油は別途供給される水素と混合されリアクタ上部から供給され、原料油と水素が充填触媒層のなか

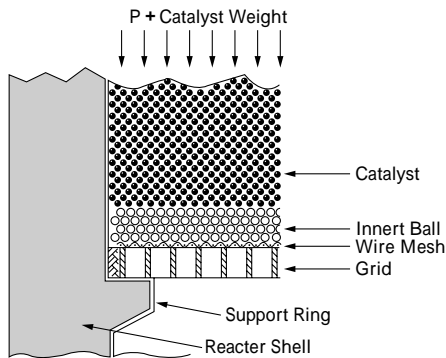


第 1 図 リアクタ形状および仕様
Fig. 1 Specification of typical reactor

を通過する間に高温高压の環境下で脱硫反応と分解反応が同時に起こるが、これらは発熱反応であるため温度上昇が起こる。もともと厳しい運転条件であるが、リアクタの設計温度に大きな余裕はなく、発熱反応による温度上昇によりリアクタの一部分でも設計温度限界を超さないために、リアクタ内部に冷たいガスや液を吹き込んだり複数のリアクタの場合は接続している配管の途中で冷たいガスを吹き込むなどして冷却する方策がとられる。触媒は反応中はそれ自体に変化はなくても、複数の原因で徐々に汚染されるので、運転状態によっても異なるが約一年から数年に一回更新される。

リアクタは、その爆発限界の広さから取扱いに注意を要する水素と可燃性の油とガスの混合物を高温高压の雰囲気のもとに反応させる容器である。超大型爆弾にも匹敵するので、耐圧部の材料には主として使用条件に見合った 2.25Cr-1Mo 鋼などの低合金鋼製の厳選された鍛造品が鋼板がもちいられ、主要構成部品である円筒胴と半球形の鏡板に使用される。

触媒の効率の利用を図るために、単一のリアクタのなかに複数の触媒床が設けられる設計が最近では多く採用される。この場合は、リアクタ上部にある触媒床を支えるためにリアクタの内面に触媒支持機構が必要となる。もっとも理にかなった触媒支持方式として、リアクタ内面全周にわたり均一な張り出しを設けた触媒支持リング(第2図)が採用されることが多い。触媒支持機構の各部品とこの支持リングは、触媒自体の重量と予定運転期間終了時(End of Run, 通常 EOR と呼ばれる)に触媒が目詰まりを起こし閉塞気味になったときに最大となる流動差圧の両方を支えなければならず、十分な強度を有することが要求される。



第2図 内部支持構造
Fig. 2 Internal support

1.2 リアクタに要求される仕様

1.2.1 設計規格

リアクタを設計するにはあらかじめ定められた規格にしたがわなければならないが、各国独自の規格がある場合はそれにしたがうが、従来は米国機械学会(American Society of Mechanical Engineers 以下 ASME と呼ぶ)が規定する ASME 規格とその類似の規格が主流であった。しかし、ヨーロッパ各国の規格では降伏点の 2/3 を許容応力とする高応力設計を認めているため、コストダウンの目的で採用される機会が増加する傾向にある。これに対して ASME も巻き返しを図っており EU 規格に合

わせた改訂の動きがあるが、もっとも大切なことは許容応力の高さを追い求めることではなく運転条件を考慮したうえで、真に安全な使用材料の許容応力の設定であるということを忘れてはならない。

1.2.2 母材成分

リアクタ耐圧部の強度部材としては、通常 2.25Cr-1Mo 鋼などの低合金鋼がもちいられる。材料の選択と適用にあたっては、次のような使用中の材質劣化を考慮しなければならない。まず、水素侵食とよばれる高温高压水素環境下での劣化と損傷である。これを防止するために、各種の鋼に対する使用可能限界を示したいわゆるネルソン線図(API Recommended Practice 941)がもちいられる。この線図は経験の蓄積とともに改定されて現在は第5版である。しかしながらまだ完全なものではなく、当社も貢献してさらに改訂作業が続いており、将来、理論的に裏付けられたより精密なものになるであろう。

高温での使用中に材料が脆化してしまうという焼もどし脆性の減少にも、多大の努力が払われてきた。この脆化の度合いを示す代表的な指標(Factor)は、

$$J = (Si + Mn) \times (P + Sn) \times 10^4 \text{ と、}$$

$$X = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^2 \text{ (元素量単位は mass\%)} \text{ であり、}$$

精錬技術や脱酸法の改善、原料(スクラップ)管理によって清浄度向上の努力が続けられた結果、これらの指標値の管理がほぼ可能になった。

水素脆化特性の把握もリアクタの安全性を保證する上で重要であり、JPVRC(日本圧力容器研究会議)の共同研究をはじめ多くの実験がおこなわれてきた。最近、とくに老朽化したリアクタを対象にした系統的なデータ取得の必要性が生じており、このための共同研究プロジェクトが米国を中心とした石油メジャなどによって編成され、当社も主要な実験を分担している。

なお、以上の材質劣化は運転開始後に生じて、リアクタに要求される基本的性能の一つである低温靱性に悪影響を与える。いっぽう、製造時の低温靱性もいちじるしく改善されてきた。それにともない年代的にシャルピー衝撃試験における吸収エネルギーを基準として保証温度は 50 F, 0 F, -20 F と変化した。

1.2.3 母材溶接

通常母材の溶接にもちいられる方法はサブマージーク溶接(SAW)、被覆アーク溶接(SMAW)、ティグ溶接(GTAW)である。溶接材料は主に線材から作られるので、高性能線材を得手とする当社の溶接材料製造技術は歴史的に世界最高水準にあり、とくにリアクタの溶接材料の性能については高い評価をえている。溶着金属は母材にくらべて焼き戻し脆化感受性が高く、成分規定の前記 J と X を一定量以下に管理すると同時に実際に使用する溶接材料に対して焼き戻し脆化促進試験(Step Cooling Test)を実施し、厳重な管理のもとに合格品の溶材のみを使用することが許される。

また、大規模な溶接部の割れを回避するため、母材の主要溶接部について溶接完了後、温度を下げることなくその溶接部を一旦 600 程度の高温に保持することにより、溶接により生じた残留応力の低減と溶接中に溶

接部に蓄積した拡散性の水素を放出する中間焼鈍 (Intermediate Stress Relief, 以下 ISR と呼ぶ) を実施することが歴史的に常識であった。当社は他社に先駆けて一部の溶接継手に対して、溶接完了直後に溶接部を ISR よりもはるかに低い温度で一定時間加熱して、拡散性水素の量を問題のない値まで低減することにより、ISR を省略する方法を開発しリアクタの製造に適用した。この方法は低温直後熱処理や DHT (Dehydrogenation Treatment) Post Heating など色々な名称で呼ばれている技術である。単純形状の溶接部に対しては、極端に不連続な残留応力の発生は無視できることから、溶接中に入念な温度管理をすることにより DHT の有効性が確認され ISR が省略されることが多くなっている。

1 2 4 オーバーレイ

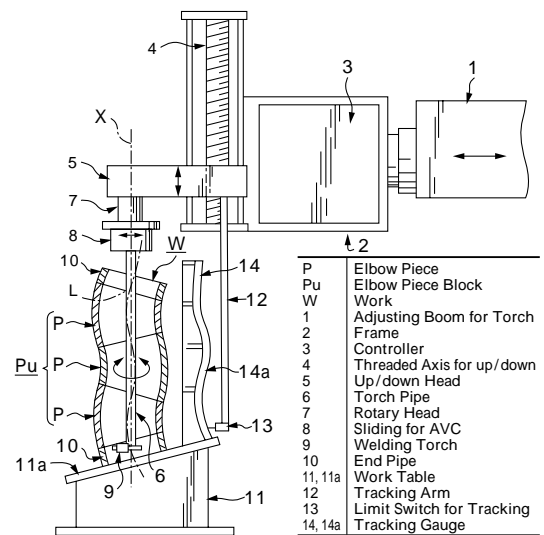
リアクタ内の反応により硫化水素などの腐食性成分が発生し、低合金鋼そのままでは腐食により長期運転中に減肉が発生するので、通常リアクタ内面は耐食の目的から、全面にわたってオーステナイトステンレス鋼の溶接肉盛 (以下オーバーレイと呼ぶ) が施される。オーバーレイは以前は 2 層以上を肉盛することが多かったが、最近では 2 層盛りと同等の品質を維持しながら 1 層盛りで仕上げることが主流となりつつある。通常は処理油の性状に応じて決定されるステンレス鋼成分を 2.5~3.2mm の厚さで保証することが多く、もちいられる溶接方法は広大な表面に対しては帯状電極を使用した SAW が ESW (エレクトロスラグ溶接) 限られた面積の面に対しては面積や溶接時の姿勢に応じて FCAW (フラックスコアアーク溶接), SMAW, GTAW などもちいられることが多い。

このオーバーレイは常時母材に十分な強度で密着していることが要求されるが、運転停止などの非正常状態では運転中にオーバーレイとリアクタ耐圧母材中に侵入した水素の再平衡移動傾向により、ときとして母材からの剥離を発生させるような過酷な状況が発生することがある。高効率な肉盛溶接方法を採用することにより、オーバーレイ溶接の能率を向上させることは可能であるが、耐剥離性を損なうような溶接方法は採用するべきでなく、新しい溶接方法を採用するような場合はリアクタが経験するもっとも過酷な状況を模擬した剥離試験を実施して、耐剥離強度の確認をすることが肝要である。

当社ではリアクタ胴体内面には 75mm 幅の電極を持

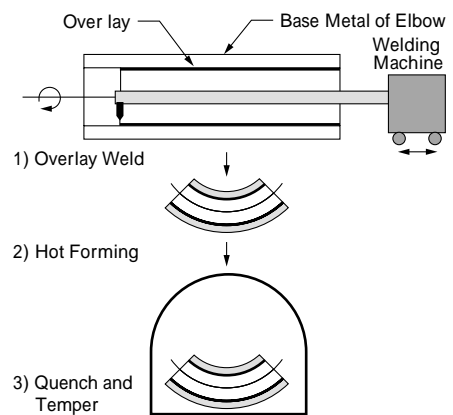


写真 1 三電極オーバーレイ装置
Photo 1 3 head overlay weld equipment



第 3 図 エルボ内面自動オーバーレイ装置

Fig. 3 Overlay machine inside elbow



第 4 図 オーバーレイ付き一体エルボ

Fig. 4 Single piece elbow with overlay

った溶接装置が同時に三台稼働する方法 (写真 1) を、半球形の鏡板内面のオーバーレイには単電極 75mm 幅の溶接装置に做い装置を設けたスパイラル状の連続溶接を採用して生産効率を向上させている。

さらにノズルやエルボなどの比較的小径の部品のオーバーレイ溶接は、数量が多い割には能率が低いことが多いので様々な高効率オーバーレイ方法が開発された。とくに三次元形状となる 90 度エルボの内面のオーバーレイ方法の開発は試行錯誤の連続であり、当初は手間がかかるうえに仕上がり表面状態も粗末な SMAW 法であったが、30 度分割品を互い違いに三個仮合わせした後に GTAW 法¹⁾²⁾によりオーバーレイをしたあとふたたび 30 度分割品に分離したり (第 3 図), 水平状態の直管の内面に GTAW 法により下向き姿勢でオーバーレイしたあと、特殊な温度管理のもとに熱間成形により 90 度エルボを完成するという画期的な方法 (第 4 図) まで実用化されている。オーバーレイに対しては溶接時の高温割れを防ぐと同時に、リアクタ本体の溶接後熱処理の際の脆化を減少させるためにデルタフェライト量の下限と上限が規定される。

1 2 5 非破壊検査

溶接部の主な非破壊検査 (Nondestructive Examination) は放射線透過試験 (以下 RT と呼ぶ) が主流であったが、

RT はリアクタのような厚肉の溶接部の検査では必ずしも万全とはいえないので、TOFD (Time of Flight Diffraction) などの特別な超音波検査 (以下 UT と呼ぶ) による RT の代用が実用化され始めている。これは近年の UT 技術とコンピュータデータ処理技術の飛躍的進歩によるところが大きい。

この UT 技術の進歩は、従来には見られなかった機器完成時の主要溶接部の情報 (たとえば許容サイズのきずの詳細位置と形状など) を保存し、運転開始後にきず状態の変遷を定期的に比較することを可能にした。このようにすることを、リアクタも個別に異なる生まれながらの情報を持っていて、これを管理するという意味で、個人個人異なる指紋という言葉をもちいて Finger Printing (機器の指紋識別) と呼んでいる。

2. 近年のリアクタ関係の歩み

2.1 新材料, 改良鋼

1980 年台前半に米国の API と MPC (The Materials Properties Council) の主導により、次期石油代替燃料と予想される石炭から液体燃料を作る石炭液化リアクタ用として高強度改良鋼の開発が、石油メジャと主要リアクタメーカー各社によりおこなわれた。この成果として 3Cr-1Mo-V 鋼が開発され 1983 年に ASME 規格にも登場したが、3Cr-1Mo-V 鋼は目標とされた石炭液化リアクタ用の設計温度である 900 度 (482 度) では必要な強度がえられなかったため、その次の候補材料として 2.25Cr-1Mo-V 改良鋼が提案され、結果として 1991 年に ASME に Code Case 2098 として認められた。

この規格には当社が開発した 2.25Cr-1Mo-V-Cb-Ca 鋼が含まれており、当社はこの母材と新たに開発した溶接材料をもちいて 2.25Cr-1Mo-V 改良鋼製の製油所向けリアクタを 1997 年に世界に先駆けて製作するとともに、引き続き 1999 年には 1360 トンの世界最大級のリアクタを米国向けに製作出荷した (写真 2)。この改良鋼は (製造には高度の技術を要するが) 水素侵食、水素脆化、オーバーレイの剥離をほとんど心配する必要がなく、焼もどし脆化も従来鋼の半分以下という画期的な性能を有している。

2.2 超大型リアクタへの対応

1) 大型リアクタ組立工場

近年のリアクタの大型化に対応するために、当社では 1995 年には 2200 トンの大型リアクタ組立工場を完成させた (写真 3)。この大型リアクタ組立工場では、最終の円周溶接以降の工事に必要な設備がそろっている。

2) 現地組立工事

時としてリアクタの重量やサイズが設置現場までの経路の輸送限界を超えてしまうケースがあり、このようなときには輸送可能なサイズにリアクタを分割して出荷して、設置場所の近辺で最終組立溶接する方法をとることが一般的である。

3. 今後の展望

全体の傾向として、1985~1999 の間は重油の脱硫と



写真 2 2.25Cr-1Mo-V 改良鋼製リアクタ
Photo 2 2.25Cr-1Mo-V modified steel reactor



写真 3 播磨大型リアクタ組立工場 (max 2200ton)
Photo 3 HARIMA final assembling shop (max 2200ton)

同時に重油から輸送用の高価な燃料油であるジェット燃料、ディーゼル油、ガソリンなどのいわゆる白油を製造できる Up-grading リアクタの需要が主流であったが、2000 年に入ると地球全体の環境保全の観点から、ガソリンとディーゼル油の硫黄含有量の規制が強化され、超深度脱硫用の中厚肉リアクタの需要の急増が予想される。

いっぽう、リアクタは通常の石油よりも重質分を多く含むカナダアルバータ州のオイルサンドや、南米オリノコ原油の処理や、枯渇が危惧されている石油に代わる石炭を原料とする石炭液化油の製造にも適用が計画されているので、その用途の拡大が期待されている。

むすび = リアクタを製作する上での設備面での不利が解消したあと、当社の技術力を結集し競合メーカーとの幾多の切磋琢磨を経て、世界最大のリアクタ生産シェアを占めるに至った。今後、各国のエネルギー政策や世界的な環境規制の動向により、従来は利用されなかった重質原油の処理と燃料用白油の超深度脱硫用のリアクタも必要になると考えられるので、さらに競争力のある良質なリアクタを世界中に供給していく所存である。

参考文献

- 1) 特許: 技開平 7 - 116837 .
- 2) 特許: 技開平 7 - 116838 .