資 料

原子力工業における溶接技術者の重要性

“The Importance of the Welding Engineer to the Nuclear Industry”

F.W. Davis* and E.B. LaVelle**

(この論文は米国の有力な原子力メーカーである G.E. 社のラベル技師より寄稿されたもので、内容は原子炉の溶接に関連して参考になるところが多いので、ここに全訳して掲載する。)

比較的若い産業である原子力工業は、材料の接合について色々の問題を提供しているが、これらは人類が最初金属を造り始めてこのかた遭遇した最も挑戦的なものといえよう。この産業の発展は、溶接技術者がこれら数多くの複雑な課題を、いかに早急に解決するか否かにかかっているといても過言ではない。溶接技術者は、これらの新奇な特性を有する金属について、その接合技術を開発しなければならないが、溶接には、極度の高温における使用および中性子衝撃に曝されてもよくこれに堪え、損傷を受けない性質が要求されている。その上装置は運転中非常に放射性が強くなることから、溶接の完全性に対する要求はこれ迄になく高いものとなる。

工業用動力

原子力の平和利用は、我々の文明に対し最大の恩恵を約束するものであるが、これを工業用動力とする方法の開発に当って遭遇する問題について略述してみよう。

アメリカでは、動力開発にはまず加圧水型の炉が採用された。炉の本体は、主として水を満たした圧力容器の中に沈めた燃料物質のコア（炉心部）からなる。燃料要素から生じる熱はすべて対流と伝導によって奪い去られるのであるから、したがって組立てられたコアには大きい表面積が必要なので、このため全体が大きい体積となる。その結果として、圧力容器の寸法は従来の圧力容器の概念を遙か

に超えたものとなる。

ウランの金属学的な性質からして、その操業は 1000°F (540°C) よりずっと低い温度に制限される。その結果、利用熱量を最小にするために炉は高圧操業が必要になる。大きい体積と高い圧力という圧力容器の概念からして、その壁厚についても、今迄考えられもしなかったようなものが必要となることは明らかである。

今一つ考慮すべき点として、水の腐食作用がある。この水は減速材として働く一方、燃料要素から出る熱を熱交換器へと伝達する役割を果し、熱交換器中では水蒸気がつくられる。燃料を焚く蒸気発電機では、腐食はさして関係なく、炭素鋼はその点非常に満足すべき働きをするものである。しかし炉に使われるような高純度の水は、予想される操業温度においては、炭素鋼に対して非常に腐食性が高い。現在手に入る資料によれば、18%クロム、8%ニッケルという取合せがこの種の作業に適しているということである。経済的な理由とか溶接の点などを考慮して、加圧水型炉は炭素鋼で造り、それを 8-8Cr-Ni 鋼の一種でクラッドしてある。

このため溶接技術者には、厚さ 3～10 インチのステンレスクラッド炭素鋼に、高度に完全な溶接を施すべき適当な溶接法の開発が委託されているのである。縦とか周囲の溶接と同じく、ステンレスクラッド炭素鋼のノズルを容器に溶接することなども含まれる。これらはいずれもスラグ巻き込みとか、割れ、微小割れなどが皆無でなければならない。

しかし原子炉に関しては、それだけでは十分ではない。この産業に独特の現象で、溶接に関する限りいまだかつて遭遇したことのないものがある。炉の圧力容器は、その全体が終始中性子の衝撃ならびにガンマ線照射の対象となる。ガンマ線は金属の中に熱を生じる。この発生熱は分厚い壁

* F.W. Davis, Metallurgical Engineer, Division of Reactor Development, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, D.C. Chairman, AEC Welding Committee.

** E.B. LaVelle, Senior Engineer, Pressure Vessel and Piping Codes, Hanford Atomic Products Operation, General Electric Company, Richland, Washington.

の構造に多少の内部応力を生じる。放射強度は運転速度の変化に応じて変るから、この応力も幾分か周期的である。中性子の衝撃に長時間曝した場合のデータは、完全というには程遠いものであるが、多くの材料は比較的短時間で侵されることがわかっている。たとえばある種の鋼では、脆性破壊の遷移温度が、熱中性子に短時間曝することによって著しく上昇する。そこで溶接に対する他の条件として今一つの条件を加えねばならない。すなわち溶接部またはその隣接部は、どの部分も脆弱であってはならないし、また長時間中性子衝撃に曝されて脆化する部分があってはならないという点である。

厚壁の構造にできる溶接微小割れを防ぐ方法として、溶着金属をおく時に中間応力除去燃鈍をすることがある。最初の炉の圧力容器は、コロンビウム安定化ステンレス鋼で被覆した炭素鋼で造られた。しかし、しばらくたってこの応力除去処理法によって炭素とコロンビウムとクロムが、ステンレス鋼溶接部の熱影響域で再結合することがわかった。これによって炭化クロムが結晶粒界に凝結する結果“ナイフライン”腐食に敏感になる。この感受性は、 1650°F (900°C) での最終的な熱処理で除去できるが、最も簡単な解決法は被覆用ステンレス鋼に極低炭素のもの ($<0.03\%$) を使うことである。

脆化の問題はいくらか難しいように思われる。適当な溶接法をもってしても、炭素鋼の上にステンレス鋼を溶着する場合、あるいはその逆の場合には炭素鋼にニッケルおよびクロムが加わって、硬く脆い合金になる部分ができる。普通の場合はこの現象はさして問題とはならない。脆化域は全溶接面に対して比較的小さく、また普通の静荷重を受けるときはトラブルを起さぬようである。

しかしながら原子力関係となると事情は甚しく異なる。溶接ビード中の硬く脆い材質はそれが小さいものでも、周期的な内部応力の下にあってはクラックの原因となりうるのである。なおかつ、中性子の衝撃がこの脆化を質、量ともに増大することも予想される。

溶接部の脆化を避ける一つの方法は、炭素鋼とステンレス鋼の溶着金属の間に、事実上炭素を含まない鉄の層をおくことである。たとえば容器のパット溶接において、最初にステンレス鋼の内貼りの溶接をするのであるが、これは容器の内側からおこなう。次に外側からこの溶接の初層を注意深く切りとる。この時ステンレス鋼が炭素鋼と溶け合っている部分を完全に除去するよう注意する。そこで外側からステンレス合金の露出面全体に溶製鉄（炭素を含まない純粋なもの）を溶着してこれをおおう。こうして炭素鋼に適当な方法を用いて溶接を完成することができる。同じ原則はノズルその他の付属物を容器の壁に溶接する場合にも採用されるが、各設計にはそれぞれに問題があって合金

すべき各種成分とか、それぞれに異なる熱膨脹係数などに考慮を払わねばならないことを銘記すべきである。

燃料要素の製作にもまた溶接についての問題が付随する。低温における操業には、ウラン合金を純アルミニウムで被覆した燃料要素が好成績を収めている。ここで問題は、ウラン合金を水の腐食作用に耐えるように密栓する点にある。また燃料と被覆との間の接着も完全なものでなければ、接着不良の部分にホットスポットができて役に立たなくなる。動力用原子炉では、アルミ被覆は高温において高純度の水と作用するため十分とはいえない。ジルコニウムは、その好ましい核特性と耐食性の点から、動力炉用の燃料体の被覆に好んで多く用いられる。純ジルコニウムも高い耐食性を持つが、しかしわずかな量の酸素および窒素によってこの性質が著しく損うことが知られている。これらのガスに対する親和力の故にジルコニウムの溶接は雰囲気をアルゴンかヘリウムで置換した“ドライボックス”中で行わなければならないのである。これは面倒な方法のようであるが、しかし今のところこれに代るべき満足な方法は発見されていない。

放射線化学処理装置

原子炉やその他の原子力応用に関しては多くの発表がなされているが、放射線化学処理に対する本質的な要求についての文献は比較的乏しい。ウランウムの同位元素が非常に複雑な化学的方法によらなければ分離や製造ができないこととか、放射後の燃料要素を完全に再処理せねばならぬことなどを考える時、この活性面が現在原子処理工場における産業的顧慮の大部分を占めていると感じざるをえない。

原子力の装置に使われる化学処理装置は、工業技術史上に特異なものとして、珍しい設計上の問題を含んでいる。処理系統中の重要部分については、失敗した場合取返しがつかないという事実は設計技師と装置の運転責任者にとっての深刻な関心事である。放射性物質や液体に曝される容器やパイプ装置などは、放射性が高くなり甚しく汚染されるので、その補修や分解は普通の手段をもってしては不可能であり、完全な方法というものはない。このような事態を改善すべき知識や経験は将来に期待するほかない。

系統を構成するパイプや容器は壁の内容液による正常の摩耗速度によって材料の厚さを概算し、経済的な考慮のもとに装置の寿命をできるだけ引伸ばすようにする。非常にホット（熱的になく放射性的）な容器は、比較的短期間の操業で破損するような場合にも、不幸にしてその原因はおろか損傷箇所をも視覚的に断定できないのである。そこで代りの容器の計画、製図、仕様書などを作成すべき設計技師は、想像的に判断の必要がある。すなわち

設計を改善すべきか、それとも製作時のエラーを検査員が見落したためであるか、使用した材料が悪かったのか、また据付け中とか運転中の損傷によって装置の破損が起ったのかという判断である。装置の補修のために、破損した部分を取外す際には、作業員の危険を考慮して遠隔操作の解体工場でこれをおこなう。ここで装置の主要部分を次々に解体して破損部を露出して十分に汚染除去を行うが、この際に綿密な肉眼検査による損傷原因の究明も可能である。

原子力装置では“汚染”という言葉は、きちんと分けられていた放射性物質が、材料の表面に付着するようになる状態を指すのである。装置の形状は、そのような汚染物質の除去を極度に困難なものにしている。これらの物質から発する放射能は、ある場合は比較的少く取るに足りぬ程度であるが、またある場合には非常に激しく、このため十分な厚さの鉛、コンクリートあるいは水などを使うとか、比較的大きく距離をとるなどの方法によって係員を保護せねばならない。汚染物質の放射能の寿命は数秒間から幾千年にも及ぶといわれている。

ある場合には損傷装置を取りのけて放射性を実際の作業時間の限度が許される程度、または汚染物質の除去に標準の除去法が適用できる程度に衰えさせることも可能である。乾式処理容器はすべて放射性作業後の方が、実際の作業中よりもかえって放射性が強いという変則的な事態がある。装置を廃棄すべきか、それとも修理が可能であるかということ、は、放射性の程度を測定した後に決定される。

以上の紹介によっても明らかに溶接には次の二大区分、

(1)最初の製作および据付、および (2)維持 を考慮せねばならない。

各部分の設計や製作には、厳正な制御が必要であるが、修理溶接の困難さを詳細に述べよう。実際にはできるだけ高い品質と完全性を成就するため何らかの製作制御を用いているようであるが、これは放射能が強くて即刻修理の不可能な場合は別として、破損装置の修理溶接は極端に高価につくのでこれを避けるためである。

原子力装置における修理溶接

“近接”修理は放射性物質を処理する多くの装置では不可能である⁷⁾。そうした場所では放射能が強いため、作業員は何フィートものコンクリートとか、等量の厚さの銅、鉛、水またはそれに代る防禦材の遮蔽なしには近づくことができない。また装置の取外し、置換えなどは遠隔手段によらねばならず、作業員は装置の観察に潜望鏡またはテレビ装置を使うのである。Fig. 1 は操業位置にある容器の潜望鏡観察である。こうした手段によって、全作業を履行することの困難なことは容易に想像されよう。

容器は深いコンクリートの穴の中に据えつけ、その上を大きいステップカットコンクリートカバーブロックでふさいで放射能をさえぎる。一旦建造した後はこれら容器の上や周辺では一切作業は行われず、ユニットは最初の操業に入る。こうした容器の欠陥は、単に遠隔操作による繁雑さや時間、または費用などの点からばかりでなく、とり返しのつかぬ製作上の損失をとまなう点で重大な問題を提示す

Fig. 1 Periscope view of vessel

Fig. 2 Stainless steel vessel

Fig. 3 Equipment on flatcar enroute to burial

るのである。

放射線化学処理装置における今一つの装置例を Fig. 2 に示す。図示したステンレス鋼濃縮機は約 \$ 250,000 するが、大体高さ40フィート、重さ約40トンである。この製作には多くの高度な細工や溶接が必要である。しかしながら最初にプラントが始動した後、洩れたり具合の悪いところがあれば遠隔操作装置によってその位置から取り外し、後で永久的な廃棄処分にせねばならない。コンクリートの遮蔽の外へ出す場合には、作業員は破損物からの距離および時間間隔について放射能監視係員の指示にしたがうことによりその安全を保つことができる。放射能警告係員はこの種の作業に先立ち、放射能を測定する。

Fig. 3 に示したのは装置の損傷部分を、写真右方にみえる大きい金属貼りの箱に納めて台車にのせ、廃棄場所へ運ぶところである。放射能警告係員が機関車のデッキに乗っているのが見えるが、手にした道具で箱の中から出る放射能の量を検べているのである。この場合、損傷部品を運ぶ台車は、機関車から 600 フィート離れているが、係員はこの位置に30分以

上とどまることは許されなかった。廃棄場所へ到達すると、予め用意してある穴の中へ損傷部分をひっぱり込み、この上を歩く人が放射能の影響を受けない程度にまで土でおおう。このような作業に、極端に高額な費用がかかることは

Fig. 4 Interior of stainless steel vessel

明らかである。こうした非常に危険な損傷装置を溶接修理することなどは、まったく実行不可能なことである。しかし放射性物質の放射能半減期が比較的短いものであれば、暫時損傷箇所を取りのけ、念入りの汚染除去法によって実際の作業期間中の作業の継続と溶接の安全を図ることもできる。人間が近づいて溶接するのに、ほんの数分間しか許されないよう損傷箇所の修理も行なわれているが、それが機械工作を含むような場合には、人の接触作業のできるのはわずか数秒間でしかない。作業員は一人が一日にただ一回の作業期間しか許されていない。つまりその作業員は、一作業期間を終了すれば“照射放免（パードアウト）”ということになる。

Fig. 4 はステンレス鋼製化学処理容器の内側を示しているが、この中では溶接部が先ず侵されている。いろいろの理由で実験室の腐食試験用に実際の使用中の溶液と同じものを用意することが不可能な場合など、設計者が溶接金属や、処理溶接の腐食に様な耐食性を呈するような母材などを用意することが非常に困難になる。ある用途には普通の腐食試験は無意味である。それは処理溶液が実験室の試験に用いられないような放射性物質を含んでいるからである。このような場合には、場合に応じた適切な方法が採用され、過去の苦い経験で得た知識をもって未来の設計の基礎とするのである。この写真の容器は、汚染を極度に除去してあるが、それでもなおかつ溶接工は20分以上の作業は許されない。そのような短時間では腐食をうけた部分に新しい金属を盛って、容器を復旧することなどは実行不可能としか考えられない。

放射線処理装置の補修には、まったく新しい作業哲学がある。今日迄工業用工場全体にわたって、第一に考慮されてきたことは、普通の作業安全規程を使って、迅速かつ有効に維持、補修作業を遂行するという点であった。しかしながら原子力装置において無視されている懸念があるのは、周囲から放射能を受けることによって、著しく影響される作業に日常従事する作業員の十分な保護ということである。

放射線処理装置に関する修理作業や溶接では、補修ならびに修理作業が、どの面でも完全に制御され、かつそれが保たれるということが非常に重要なのである。ある重要なまた特殊な作業をする場合、これを運まかせにしたりまたは、溶接工や機械工各自のカatalog的知識などに頼ったりしてはならない。

放射線化学処理装置の補修や取換えの際の、溶接補修作業の典型的な順序を以下に述べよう。

- (1) 放射線処理の配管系統に損傷が生じた時には、代りのものを溶接する必要がある。
- (2) 放射能監視委員は、作業区域の放射能を測定し、あ

る距離点における作業時間制限を規定する。

- (3) 作業員の防護服装はどれにすべきか決定する。Fig. 5 は特殊な防護服を着た溶接工が処理系統を補修しているところである。二重ねの全身服を着て、靴カバーをつけその上をさらにゴムで掩い、手術

Fig. 5 Welder working on process line

用手袋の上からゴムの長手袋をはめ、布製帽子と空気マスクを付けている。ある作業条件では、こうした防護手段でもまだ不十分と考えられ、たとえば雰囲気中の放射粒子状物質の危険が極端に大きい場所で修理溶接する際には、Fig. 6 のような防護装備をさらに着用する。溶接工は透明なプラスチックの中に入ってもその行動はまったく自由で、周囲に漂っていると思われる致死的な放射能塵から完全に護られている。

- (4) 仕事は模型で練習するが、作業員は仕事を細目に至る迄すっかり理解するよう操作を下稽古することが要求される。

Fig. 6 Protective apparatus for extremely dangerous atmosphere condition work

- (5) 作業場所および取り換え装置は、作業時間制限を長くするために、できる限り汚染を除去する。
 (6) 底のあるパイプは取り去り、取換溶接の準備をしておく。
 (7) 溶接装置は、機能の妥当性をチェックしておく。
 (8) 仕事を開始し、溶接工の作業時間制限一杯迄続行する。
 (9) 時間制限に達すれば作業を中止し、仕事の完成と否にかかわらず作業区域を離れるように要求される。
 (10) 仕事のすんだ溶接工は現在の状況を予定の次の溶接工に報告し、続行するための注意を与える。
 (11) 仕事の割当計画にしたがって、次の溶接工が仕事を続ける。
 (12) この方法で溶接の仕事が完了する迄続ける。
 (13) 溶接を検査し試験する。
 (14) 作業区域をすっかり清浄にし、修理作業の結果生じた過剰放射性物質をすべて除去し、これを確認するためもう一度放射能を検査する(放射性物質にアークが作用すると、それが蒸気となって雰囲気汚染することがわっている)。
 (15) 装置は再び運転にもどる。
 (16) 各作業員は仕事を離れる際に放射能汚染の検査を受ける。Fig. 7 に示すのは放射能監視係員が、たった今放射性のある修理作業を終ったばかりの溶接工を検査しているところである。放射能の異常な状態は報告され、記録しておいて作業員を汚染から護る方法の開発に役立てる
 (17) 仕事に使った装置も汚染を受けるが、これは汚染除去をしたりまたは保護場所にしまっておき再使用する。

Fig. 8 は一団の人々が損傷部分を放射線化学設備から取外しているところである。プラスチックの袋で包んでから修理溶接のため、汚染除去の可能なところへ運ぶか、もしくはその汚染の

除去が不可能と判定されれば最終的に廃棄する。ビニルのカバーにより汚染が他の区域に拡がることを防ぎこれを取除いて、汚染物質を正規の容器に納める迄の間、プラスチックのカバーの中へ封入しておくのである。側

Fig. 7 Welder being surveyed for radioactivity

に二人立っているのは、作業中の誰かがその作業時間制限が切れたときの交代要員である。このように実際にはその作業に従事してない作業員が要るということは非常に高価につくわけである。こうした作業における労賃は、一般の工業的維持状況で

Fig. 8 Workmen removing failed equipment

は法外的なものと思われ、それで仕事の計画を立てることが、この上なく大切なものとなるわけである。放射性処理装置の補修溶接作業は非常に高価につくのであるが、交換の必要のある場合とか、損傷が生じた場合には避けることはできない。

原子力装置の建造

溶接の根本に考慮が至らぬため損傷を生じたと思われる高価な装置や機械の不時の廃棄処分を避けるためには、現在行なわれている方法をどのように改めたらよいのか。(1) 設計、(2) 材料、(3) 方法や施工、(4) 溶接工の技倆検定、(5) 十分な管理、および(6) 検査ならびに試験などを考慮した綿密な配慮によって、経済的にも納得できる程度にまで装置の寿命を引伸ばすため、合理的な予防策がとられているか否かを確かめることである。

配管系統の分類

配管は放射線化学処理装置の相当部分を占めているが、便宜上これを大きく四つに区分してみることにした。

(1) 建物の不可欠の配管

この部類に含まれるのは、コンクリートに埋められるパイプ、近づき難い場所のパイプ溝、またはその他の放射能の強い場所に敷設されるものなどである。Fig. 9 はこのような装置の複雑なもので、一旦操業に入ると修理不可能な程度にまで放射能が強くなるので人が近づけなくなる。装置に不可欠な部分であるこのパイプが損傷すれば、装置の適応性は減じ全体の効率が下がることになる。永久配管の破損が何箇所も起ると全装置の閉鎖や廃棄の原因となることが想像される。この目的の配管や溶接はできる限り立派なものであることが要求される。

Fig. 9 Piping installation

(2) 取替可能な容器の不可欠部分の配管

この部類に入るのは、熱交換コイル、コイルの多岐管、および時には容器壁の側管などを含むのである。こうした場所のステンレス鋼とくにコイルでは、激しい機械的および腐食作用を受ける。

放射性の強い物質の汚染を受けると、容器は修理することができなくなるし、また破損の正確な原因をつきとめることもほとんどできない。こうした配管の損傷によって、容器全体の取替が必要となり、生産のロスをとまうことになる。それ故、高品質の溶接の必要は明白である。

(3) 取替可能で、しかも放射能汚染によって修理不可能な配管

この部類に属するものは、多くの遠隔場所のパイプジャンパー、管状熱交換器管束および取替可能なコイルなどである。これらのものもまた直接、間接に高価なものとなる。多くの場合、ただ一つの部品を取替のために装置全体を閉鎖しなければならない。Fig. 10 はパヨネット型の熱交換器で、これが運転中に破損すれば外して取替えねばならない。この作業は展望鏡とテレビで観察しながら、遠隔制御装置を操縦しておこなう。Fig. 11 は遠隔操作で取付けるパイプジャンパーである。ジャンパーの両端部の取付具によって、容器または装置を建物自身の固定具に結びつけている。写真のジャンパーは比較的単純な設計の一例である。しかしジャンパーによっては、非常に複雑で高価なものもある。こうしたものは製作過程を通じて、寸法精度が極端にきびしく各部分の寸法許容限を超えることは許されない。

Fig. 10 Bayonet-Type heat exchanger

Fig. 11 Pipe jumper

(4) 接触して修理することが可能な配管

この部類には、設備配管と放射能汚染の軽度なものなどが含まれる。この設備は余り危険性もなく、他の非放射性物質を取扱う大部分の工業化学装置における設備配管と同じ程度のものである。結局放射線化学処理装置の寿命は、接触不可能な永久配管の寿命によって規定されているのである。予備の配管やジュリイリッド装置が消耗した時には、装置は閉鎖され、休止したとみなさねばならぬ。このように数十数百億という投資が接触不可能な場所に埋設される配管の溶接の質に特にかかっているのである。この事情がわかれば配管系統類に最高度の溶接を行うために有効な方法、技術を開発することに対して、これらの仕事の責任者達から常に注目されてしかるべきことである。

設 計

設計はその装置なり器械なりが、割当てられた義務をもっとも効果的に果すように工夫せねばならない。この目的の達成のために、設計者は耐食性金属、合金などを接合すべき溶接法の可能性と限界について知悉しておらねばならない。また設計者は製作係員や溶接技術者と密接な連絡をとることが大切で、それによって溶接法の改善や技術を知り、これを適用することができる。

材 料

放射線化学処理装置に使われる材料は、青図に示される場所に設計者が指定する材料が使われることを確実にするため、適当な選別と刻印を行って管理せねばならぬ。これらの装置に使われる材料の大部分は非常に高価であるが、しかし経済的な要素はさておき、使用溶接による腐食浸透に対する十分な抵抗という問題が第一に大事な点である。最近ではある種のステンレス鋼の腐食試験の改良によって、品質向上が保証されることがわかった。原子力設備における経験を積むに従って、この事態は改善されるものと信じられている。数多の耐食性配管を通じて一様な品質を確保するための統計的品質管理法は、強くというよりむしろ広く考慮されているから、将来この方面に相当の収獲がえられよう。倉庫から最終の製作に至る間の材料管理に携わる者は、みな製作中の各種品目に使う表示マークをよく弁え、また正しく指示された材料だけを工作に用いる点を銘記することが、非常に大切でありまた特に重要な点でもある。放射線化学処理装置を建造または、操業しているところでは正しく指示された材料の管理制度が重要であって、その重要さは強調しすぎることはない。Fig. 12, 13 は 304L ステンレス鋼に、マクロエッチ検査で検出された欠陥である。このような欠陥は、装置の操業寿命を著しく縮めるであろう。現在米国では材料の欠陥検出のもっとも有効な非破壊検査法を開発するため、おびただしい研究が進められている。母材および溶接材料欠陥の検出なら

Fig. 12 Imperfections in stainless steel

Fig. 13 Imperfections in stainless steel

びに修正は、放射線化学装置にはきわめて重要である。

材 料 の 識 別

まちがった材料または素性のわからぬ材料を使うことは、一般の工業装置においても、安全および生産時間の見地から見て重大な結果を招くものである。原子力装置においては、そうしたことによる損害は甚大なものとなる。ほとんどの原子力装置では表示方法を使うが、これはメタル刻印、永久印刷または電気ペンといった耐久力のある識別法によって、金属や合金の識別表示するのであるが、これらの表示マークは、さらに試片を切りわけ毎に写して行く。スクラップ材の管理にこれを行うのは経済的にみて正当である。もし材料の素性が明確ならば、最も小さい試片に到る迄使うことができる。素性が明確でなければ、ポンド当り5セント見当の屑値で売り払われることもしばしばである。

原子力装置に使う材料の管理には基本的な規則がいくつか定められている。以下に述べるのがそれである。

- (1) 建造計画の期間中、材料を識別し続けるための責任の割当。
- (2) 厳密に素性を判別し難い材料は受け入れぬこと。
- (3) 試料を仕分けたら直ちに表示マークを写しておくこと。
- (4) 材料は識別しておく。これは定期的検査と、消えなかった表示マークをもとどおりに直すことを意味する。
- (5) 貯蔵材料を切断した時は、いつもできる限り残材にもとのマークをつけて倉庫にもどしておく。
- (6) 材料はすべて正確に表示マークを打って、格子棚や貯蔵箱の中へきちんと収めておく。
- (7) 溶接棒は元の容器に入れておく。ステンレス鋼やその他高価な耐食性合金の溶接棒などは特にそうにすること。
- (8) 正確な表示材料の必要なところへ素性のわからぬ材料を使わぬこと。

ある種の原力力装置では、裸ステンレス鋼の溶加線は、識別するために小さい線を一本刻むが、これは約 0.005 インチの深さとし、各棒の全長に沿って指定の間隔をおき、いずれか一方の側にのみつける。刻み目は鋭くてもまた突き出ていてもいけない。明らかにこの刻み目の間隔は、規約にしたがったものである。

溶接方法および施工

溶 接 性

不活性ガス・タングステン・アーク

(TIG) 溶接法

ある特別な応用のために選ばれる溶接法は、経済的、金

Fig. 14 Inert gas shielded tungsten arc welding

属学的な要求に見合った最適なものではない。
TIG 溶接法はこれらの点で、他の溶接法に優っている。
この方法の一般的な特徴は熟知されている。しかしながら、この方法に固有の溶接条件の調整に関する各要素が、どのように相互関係をもち、また大切であるかは、一般に理解されていない。この方法を首尾よく応用するためにこれらの多くの要素のはたす重要な役割をよりよく認識すべきであるが、またこれらをいかに制御するかということもこの方法を用いるものにとって重要なことである。溶接の統計的管理を行うには、種々の要素について詳応用細に考慮せねばならない。Fig. 14 には5つの図解が示してある。1番目は TIG 溶接法の調整における各要素の相互関係で、他の4つは各種要素の4つの主なグループの図解である。これらの要素を十分考慮すれば、製作者には製作開始と同時に、方法管理の確立が必要なが一層明確に理解されよう。科学的方法は、組織立った知識の上に確立されるのでなければならない。そして溶接作業の成否は、正しく組織された方法に従うことにかかっているのである。

この溶接法が16年前産業界に登場して以来この方法を用いるために、いろいろな溶接技術や方法が開発されてきたが、それらはみなある程度の成功を収めている。この方法によってえられる目立った利点は、耐食性金属ならびに合金類の内、外面に高度の様な溶接をえることが他の方法より容易な点である。放射線化学処理に使うパイプには、溶接の内面ができる限り平滑なことが非常に大切なことである。さもないと処理溶液で運ばれていく放射性特殊材料がわれ目に入ってそれ自身でかたまり、次第に流れを損ねるようになるのみならず、その部分に放射能が異常に堆積し、装置の正常な操業が妨げられるであろう。パイプ装置の内側にあるこうしたわれ目や低品位溶接、溶接突起などから放射性物質による汚染を除くことはそれほど有効でないが、平滑な内部溶接面はこの汚染除去を著しく容易なものにする。耐食性パイプにおいて、平滑な内部溶接面

Fig. 15 Inner surface of pipe weld

Fig. 16 Outer surface of pipe welds

を達成するのに効果的な各種の溶接技術ならびに方法はこの論文の巻末に引用した文献に述べてある。

Fig. 15 は外径 3 吋、スケージュル 40 ステンレス鋼パイプ（肉厚 5 mm）をバット溶接した内側表面であるが、これは水平固定位置で TIG 溶接法で溶接したものである。このような内部溶接面の滑らかさは、この方法の熟練工による溶接部に共通のものである。装置によっては、溶接の外側も内側と同様に平滑にして、汚染除去に便ならしめなければならない。またこの方法によってできた溶接の外側は、他の方法に比べて、機械的に非常にたやすく仕上げができるのである。Fig. 16 はこの方法で二本のステンレス鋼管をバット溶接した時の外面である。試料 1 はパイプを水平固定位置で溶接したもので、試料 2 は垂直固定位置で溶接したものである。この溶接法は薄い耐食性パイプの溶接に適しており、さらに厚板の深い溝を溶接するには、TIG 溶接よりも一般に能率がよいと考えられているシールド金属アーク溶接の第 1 層をシールド溶接するのに適している。

シールド金属アーク (MIG) 溶接法

TIG を用いる場合は、他のいかなる溶融溶接法によるよりも溶着金属の品質を一層精密に制御することができることは事実であるが、やはり不活性ガスの流れその他適当な被覆で遮蔽する消耗型金属アーク法をも見逃すことはできない。これらはいずれも独自の利点をもっている。たとえば、ステンレス鋼管の溶接の際、TIG 溶接法で平滑な初層ビードを置き、それからみぞの残部を被覆電極で埋めていくこと、などは一般に採用されている方法である。この方法であれば、風の通る工場とか、屋外などでも、アークのまわりをヘリウムで遮蔽する必要はなく、またたいいていの溶接工はタングステンアーク法によるよりも被覆棒を使う方が、ずっと早く溶接できるのである。MIG 溶接では、溶着金属の成分は溶加棒の成分によって規定される。しかし被覆棒を使う時は、溶着金属の成分は棒の被覆剤の

調節によって変えることができる。また一方、被覆棒では、溶接作業にスラグが入ってくるので、よほど注意しないとスラグ巻込みを生ずる。MIG 溶接法では、いうまでもなく単位時間の溶着金属量は、討議中の他のいずれの方法よりも多いのである。これは半ないし全自動法であるから、これを適用できる場所には、高速度で良質の溶接ができるのである。

腐食性設備によく使われるオーステナイトステンレス鋼の溶接に共通な欠陥や欠点には 3 つの型がある。溶着金属にはマイクロ割れやクレータが、また溶接の隣接母材には割れが時々発見される。溶着金属のマイクロ割れは、金属が溶接温度から冷却する際、極端に“熱間脆性”の範囲を通るため生じたものである。これを防ぐには、溶着金属の成分を調整してフェライトを適量にすればよい。もし、完全オーステナイト組織が必要であるならば、溶着金属のマンガン量を増量すればよい。母材の割れは、母材の側の熱間脆性の別の形式と考えられる。この現象を補正するには、溶着金属の降伏強度をもっと低くすればよく、それによって母材金属の歪を少なくするのである。クレータは金属の凝固の際の収縮に起因する自然の現象である。同様のことは製鋼所でインゴットを作る時にも生じる。インゴットではこのきずをパイプというが、鋼片や板材にする時このパイプの部分は切り除くのである。溶着金属の場合にもこれと同様の手段をとらねばならない。すなわち収縮孔が現われている部分を、すっかり取り除くのである。熟練工は TIG 溶接法で注意深い運棒法によりクレータ発生を大いの場合避けることができるが、これは入熱が熔融金属の流れに無関係だという事実によるものである。Fig. 17 はステンレス鋼の溶着金属に見られる代表的なクレータとクレータ割れを示したものである。

溶 接 施 工

こうして材料使用とか溶接技術に失敗がおきないようにするため、工作開始前に溶接施工を細目に至るまで確立しておかねばならぬ。

アメリカでは慣習として、ASME のボイラーと压力容器規定の第 9 項にならった施工を用い、その時々作業に

Fig. 17 Unsound pipe weld

のぞましい品質を得るのに必要な改善を加えるのである。しかし規定の要求事項は非常に一般的なものであるから、高い品質の工作にあたっては、相当多くの必要条件を加えなければ製作者と注文者の間の誤解を避けられない結果となる。顕著な一例としては、ステンレス鋼管の溶接を TIG 溶接法でおこなうとき、その内部をヘリウム、アルゴンまたは窒素などで満たして、内面または表面に燃焼や酸化が起きるのを防ぐことが必要条件となる。(こうしたことは、被覆アーク溶接法では不必要である。というのは溶接の際に溶接金属と混合する被覆剤によって、熔融金属の内面を外気による汚染から保護できるからである。)

溶接の応用に十分なる検討が必要であり、また満足な結果が期待されかつ首尾よく成就できるようにするために、仕事の制御に使うべき適正な制御手段が確立されねばならぬ。

溶 接 工 の 資 格

アメリカにおける原子力装置に使う溶接工の技師検定は、火無压力容器の ASME 規定の第 9 項により行なわれる。しかし、規定に付加される品質要求を満足させるためには、多くの改善を加えねばならない。これらはその場その場の必要に応じ広範囲に変るが、規定の要求事項が一般的に適用される地域では追加事項を規定しておかねばならぬ。非常に高い品質の仕事の場合、装置の絶対的な完全性と信頼性を確立し、かつ維持する必要のある時には、溶接学校を作って溶接工に特殊な溶接技術や施工を教えて、のぞまれる品質を確保するというのが慣例になっている。こうした特別の仕事には、最高の熟練工のみを選ぶのは当然のことである。

監 督

いうまでもなく大きい原子力装置の建造および補修溶接に絶対的な成功を収めるには、権威ある溶接の監督が大切である。監督者は実地経験に富み、広い理論的知識をもった人で始めて原子力装置の作業中に当面する種々の問題を首尾よく処理することができるのである。こうした係員に知識が欠けていると原子力機械の能力や寿命に破滅を導くことになろう。たとえば溶加材を誤用した場合など、装置が操業開始してまもなく、一連の放射線化学処理装置の残余部分を無駄にする結果となり、係員の手におえぬことになる。

検 査 と 試 験

原子力装置の検査と試験は、最初材料と溶接作業員が現場に到着すると同時に開始され、最終の受入れがすんで装置が注文者に引渡される迄続けられる。そこで係員が引継ぎ、彼ら自身の検査および試験の方法と計画を開始する

が、これは破損や廃滅によって装置が使用不能となる迄続けるのである。配管の検査と試験には、放射線検査、検孔器、特殊鏡および潜望鏡といった高度に専門化された検査道具がなければ困難である。高度に精密な配管の第1級の品質を達成し維持するためには溶接工が継手の残余を盛る前に、全溶接部の第一層を検査員が検査することが必要である。こうすれば、第一層が不満足な溶接完了品を除く必要がなくなる。

将来への展望

解決法がいまだ発見されるに到っていない難問題が多数存在するとはいうものの、溶接技術者の原子力工業に対する貢献は大なるものである。開発の最初の段階では、溶接技術者は非常に厳正な機密保持の要求に大いに悩まされたものである。ある問題について他の溶接技術者と討論するといった事は、めったにできなかった。今日では多くの面で機密保持は解除され、以前は“機密”として分類された問題でも、一般的な会議や公開の会合などで討論されよう。また米国では U.S. 原子力委員会が後援して、“溶接委員会”とよばれるものを作っているが、これは原子力開発に従事しているすべての主要会社から委員会までの溶接技術者によって結成されている。

このグループの年次大会では、溶接の計画や問題についての討論が広くおこなわれる。現在可能な成果をもっと結集することにより、溶接の開発は一般の原子力計画と歩調を合せていけると信じられる。またわれわれは、原子力開発が行われる限りにおいて、直面する問題に対して喜んで働くような溶接技術者が、すべての先進国で必要とされるであろうことを確信をもって予言することができるのである。

謝 辞

写真については、Potography Operation の援助を受け、また J.B. Fecht, C.H. Henager, R.D. Switters, C.A. Ro-

hrmann (G.E. Hanford Atomic Products Operations, Richland, Washington) 社の諸氏の技術論文を参照した。ここに謝意を表する。

鈴木春義* 訳
橋本達哉* 訳

* 金属材料技術研究所

参 考 文 献

- 1) E.B. LaVelle, "Inert Arc Welding of Stainless Steel Piping and Tubing", WELDING ARCS, Volume 19, Number 4, September, 1953.
- 2) F.J. Pilia, "Inert-Tungsten Arc Welding of Stainless Steel Piping," THE WELDING JOURNAL, 1167-1174, December, 1953.
- 3) R.T. Pursell, "Inert-Arc Field Welding of Pressure Piping," 41-46, THE WELDING JOURNAL, January, 1954.
- 4) E.B. LaVelle, "Process Adjustment in Inert-Gas-Shielded Arc Welding," 553-560, THE WELDING ENGINEER, Volume 33, Number 6, June, 1954.
- 5) T.A. Risch and A.E. Dohna, "Consumable Inert Method of Root Pass Welding," THE WELDING JOURNAL, 670-679, Volume 33, Number 7, July, 1954.
- 6) R.T. Pursell, "Joint Detail for Inert Arc Welding of Pressure Piping," THE WELDING JOURNAL, 747-751, Volume 34, Number 8, August, 1955.
- 7) E.B. LaVelle and J.M. Fox, Jr., "Maintenance Welding and Cutting Operations on Radiocactive Process Equipment," 731-740, THE WELDING JOURNAL, Volume 34, Number 8, August, 1955.
- 8) E.B. LaVelle, "Root Passes in Stainless Steel with New Inert-Arc Procedures," THE WELDING JOURNAL, 647-654, Volume 35, Number 7, July 1956.