昭和55年度 春季全国大会シンポジウム報告

原子力プラントにおける溶接技術*

栗 山 良 員**

Welding Technology for Nuclear Power Plant*

by Yoshikazu Kuriyama**

昭和55年4月8日、標記の主題で、座長栗山 (IHI) の司会により、5つの基調報告と活発な討論がなされた。

本シンポジウムの基調講演は

1. 原子炉用機器への肉盛溶接法、有井、竹中 (東芝)、糸 (IHI)。
2. オーステナイト系ステンレス鋼管の多層円周突合せ溶接への水冷法の適用とその残留応力、上田、中長 (阪大)、清水 (日立)、笠井 (阪大、大学院)。
3. ステンレス鋼管の応力腐食割れ防止—高周波加熱による残留応力の改善—、矢田、岡林 (IHI)。
4. 高温構造要素における溶接継手のクリープ性能評価に関する考察、佐藤、豊田 (阪大)、須清、松井、森、清水、佐藤 (川重)。
5. 原子力ステンレス配管の自動溶接、浜田、下山、松山 (三菱重工)。

の5件であり、原子力プラントにおける最新の溶接技術の紹介と理論解析であった。これら基調講演による問題提起に対し、下記の諸氏から貴重なコメント、示唆に富む意見の表明あるいは質問がなされた。

討論者：能戸 (日本鋼管)、妹島 (日立)、松山 (三菱重工)、百合岡 (新日鉄)、大森 (住友)、須清 (川重)、藤原 (神鋼)、豊田 (神鋼)

総括的コメントとして、稲垣 (金材研) と小倉 (横浜国大) より我国における原子力に関係する溶接技術の研究の現状と本シンポジウムの位置づけ、更に今後の研究の方向について貴重なコメントがあった。

基調報告は本誌49巻 (1980) 第1号に詳細な内容が掲載されているので、以下シンポジウムでの討論の内容を簡単に紹介する。

1. 原子力用機器への肉盛溶接法

原子炉圧力容器内面の耐食合金の肉盛溶接および表面硬化肉盛溶接の現状と問題点について、竹中 (東芝) が基調報告を行った。

能戸 (日本鋼管) は、(1) 帯状電極 SAW による肉盛溶接部を焼なました場合に発生する Under-clad Cracking に関連して、ビード幅がある値以上になると、母材に対する熱影響は一定になるので、一般に使われている Joule/cm よりも、その値を肉盛幅で割った値、又は1層肉盛厚さで比較すること、(2) 異材溶接における熱膨脹を緩和するために、インコネルが使用されるが、日本鋼管では、クラッド鋼の継手溶接及びフランジ面等の肉盛溶接でプラズマホットワイヤ法を使用しており、この方法がインコネルの肉盛に適していることを述べた。

妹島 (日立) は、(1) SA533 や SA508 鋼に 309 又は 309L ステンレス鋼を肉盛りした後、後熱処理する場合、境界部が脆化するので熱処理温度と時間を制限すること (例えば日立では $610 \pm 10^\circ\text{C}$, 40 Hr)、また (2) δ フェライトが多いと熱処理によって溶接金属が脆化するのでフェライト量を制限すること、(3) 309 (Mo) では Cr 量を24%以上にすると靱性が低下するが、規格は23~25%となっていること、更に (4) 母材からの C 移行もあるので、これらの値を制限することを提案し、他社の実状を尋ねた。

松山 (三菱重工) は、Under-clad Cracking の防止に関連して原子炉容器の広巾バンド肉盛法が今後どのように展開して行くかという切実な問題を提起した。

2. オーステナイト系ステンレス鋼の多層円周突合せ溶接への水冷法の適用とその残留応力

管内表面を水冷しながら溶接し、溶接継手部の残留応力分布の測定を行い、その理論解析を行った。溶接部内表面での残留応力は、空冷法では引張応力であるが、水

*原稿受付 昭和56年1月22日

**正 員 石川島播磨重工業(株)溶接研究所 Member, Welding Research Institute Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

冷法では圧縮応力となる。残留応力の生成機構は、溶接時の板厚方向の温度分布から説明でき、内表面の温度上昇量を小さくすることが、内面の残留応力を圧縮側へ転じさせるのに有効であると中長（阪大）は述べた。

須清（川重）は、外面加熱・内面冷却法は残留応力再配分方法として有効であるが、溶接時、過度段階を利用しているので、実用上の制限、例えば、適用板厚の上・下限があることを指摘した。

百合岡（新日鉄）は、円周溶接の残留応力問題を通常の FEM で解析する場合、長時間の計算となるが、本解析方法では、ある程度正確な応力値や変形量を比較的短時間で求めることができる。今後は計算時間を余り要しない簡易な方法による研究が必要があり、その方法として、Rayleigh-Ritz 1 次元解析法と Rybicki 等の多層溶接を 2 パスに単純化する方法で解く、2 つの方向があることを述べた。

大森（住金）は、石油や天然ガス輸送用の大径ラインパイプにおいて、溶接部の応力腐食割れが問題となり、この防止法として住金では残留応力の低減や圧縮応力化を試みた。しかし、これらのパイプラインは常時高い稼働応力（公称降伏点の 80%）が働いているため割れを防止できなかった。このような経験に基づき、本基調報告の水冷法は材質改善効果によるのか圧縮残留応力の生成によるのか尋ねた。そして材質が改善されてない場合は高負荷応力の下で応力腐食割れが発生することを指摘した。

3. ステンレス鋼管の応力腐食割れの防止—高周波加熱による残留応力の改善—

発電用原子力プラントの配管系の溶接継手に応力腐食割れが発生して以来、多くの防止対策が検討され実施されている。その一つに管内面を水冷しながら外部から高周波加熱する方法がある。これをステンレス鋼管に適用することによって管内面側に高い残留応力を与えることができたことを岡林（IHI）は報告した。

大森（住金）は、前述と同様の見解に基づき、応力腐食割れを防止するのに残留応力のみの改善（圧縮化）では不十分であることを指摘し、原子力配管での実績を尋ねた。討論者の指摘のとおりであるが、一般に、実機の配管では降伏点の 80% といった高負荷応力はなく、基調報告者の方法では降伏点の 80% 近い圧縮の残留応力が得られており、また約 2 年間の実績があるとの返答があった。

藤原（神鋼）は、高周波加熱による残留応力の改善は稼働中のプランに適用できる有効な方法であるが、割れ

が存在する場合、高周波加熱中に引張応力によって割れが進展する可能性と、逆に完了後は先端に高い圧縮応力が生じることを指摘した。

松山（三菱重工）は、内面の冷却条件、高周波コイルの設置等による温度勾配の差違など、実工事の信頼性の問題を提起した。

4. 高温構造要素における溶接継手のクリープ性能評価に関する考察

母材と溶接金属のクリープ特性の相違が溶接継手のクリープ性能におよぼす影響について、Hastelloy X の溶接継手の実験データに基づいて考察を行い、両者のクリープデータから継手クリープ性能を評価する手法及び溶接材料の選定の考え方を豊田（阪大）は報告した。

豊田（神鋼）は、(1) 実際の継手では、多軸応力状態における変形の拘束、継手の溶接金属と全溶着金属との特性の差、あるいは異方性等を考慮する必要がある、また試験片はこれらを忠実に模擬していることが望ましいこと、(2) 基調報告で、ASME Code Case N-47 の非弾性ひずみの制限規定に触れているが、これは実験室データのないような長時間での延性低下に対する考慮から設けられていることをコメントした。

5. 原子力ステンレス配管の自動溶接

PWR 型原子力発電プラントの一次系配管工事で使用する自動溶接施工法の考え方と、高品質かつ高能率の施工を行うための三菱重工で開発した自動溶接法について浜田（三菱重工）は報告した。

須清（川重）は、(1) 全姿勢自動 2 電極 TIG 溶接装置について、能率面から 2 電極を採用しているが、狭開先とし、アークによって開先壁を直接的に溶融させない偏向アーク法があることを指摘した。また (2) 基調報告ではステンレス鋳鋼について述べているが、他の鋼種への適用が期待されることを述べた。

能戸（日本鋼管）は、この種の管の溶接においては良好な裏波ビードを得ることが重要であり、その一つの方法として管の裏側から裏波ビードの生成を光の明るさによって検出し、それをフィードバックする方法を述べた。

小山（日立）は、(1) 基調報告で、TIG Weld は一般に作業能率が悪い（例えば溶接速度で 320~650 mm/min）と報告された点について、米国ダイメトリック社が 1400 mm/min のデータを出していること、(2) 一般に、ステンレス鋼の配管を全姿勢で溶接する場合、酸化しやすく、酸化防止と酸化物除去法が問題であることを述べた。

6. 総括的コメント

小倉(横浜国大)は、総括コメントとして、本シンポジウムでは残留応力を扱った報告が多かったが、残留応力以外の負荷による応力や塑性変形も考慮する必要があることを述べた。なお、原子力圧力容器に関してはJPVRCにおいても調査検討がなされており、その成果は利用する価値があり、また本シンポジウムの成果を実際の原子力プラントの溶接に生かされることを希望した。

稲垣(金材研)は次のような詳細なコメントを行った。

今回の基調報告は、主として軽水炉関係の肉盛溶接施工法及び配管系の溶接施工法が取扱われ、また高温ガス炉関係の溶接継手のクリープ破断特性が取扱われた。高速炉関係はこれらと関係は深い、直接取扱われていない。

(1) 肉盛溶接施工法に関しては、近年各種の施工法が開発実用化されており、従来の帯状電極サブマージーク溶接のほか、日本製鋼、神戸製鋼、川崎製鉄などで浅い溶込みで希釈率を小さくすることができるエレクトロスラグ方式を低融点フラックスや磁場制御などにより実現している。また三菱電機のソフトプラズマ法や住友金属の大電流 TIG 溶接法なども開発され実用されつつある。これらの一部は今回竹中らにより紹介されているが、なおクラッド鋼関係の一連の JIS などが日本高圧力技術協会 (HPI) クラッド委員会(委員長稲垣)等の活動で下記のように作成されているので参考にされたい。

JIS G0601-1977「クラッド鋼の試験方法」

JIS G3601-1977「ステンレスクラッド鋼」

JIS G3602-1980「ニッケル及びニッケル合金クラッド鋼」

JIS G3603-1980「チタンクラッド鋼」

JIS G3604-1980「銅及び銅合金クラッド鋼」

HPIS E-105-1980「ステンレスクラッド鋼の施工基準

これらの規格におけるクラッド鋼の種類としては、肉盛、圧延、爆着あるいはこれらの製造法の二つ以上の組合せを対象としている。また、原子炉用肉盛ステンレスクラッド鋼の共同研究については、日本溶接協会原子力研究委員会に既に昭和43年度科学技術庁委託研究として実施しており、その成果の要約が下記に掲載されている。

稲垣, 高圧力, Vol. 8, No. 5 (1970) p. 2102-2113.

(2) オーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接施工法については、軽水炉関係では高温水中の粒界応力腐食割れ(粒界 SCC)が問題となり、この防止対策として溶接

中に管内面を水冷してその部分を圧縮残留応力に転換させる方法や溶接後管内を水冷しながら管外からの高周波加熱によって管内面の残留応力を圧縮に転換させる方法が今回報告された。高速炉関係では、オーステナイト系ステンレス鋼が主体で、その配管系の工場溶接及び現地溶接、補修溶接の自動化・無人化、管-管板の突合せ溶接、溶接部の非破壊試験方法、溶接法の選択、特に電子ビーム溶接の適用などが問題になり、日本溶接協会原子力研究委員会では動燃事業団の委託で、三菱重工、日立製作、石井、東芝、富士電機、川重等の協力により高速炉を対象にした一連の共同調査・研究を、下記のように実施している。

(i) 昭和45~47年度, FRW 小委「高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究」

(ii) 昭和52・53年度, WQF 小委「高速炉構造材料溶接部の品質評価に関する調査」

(iii) 昭和51~54年度, PFW-B 小委「ナトリウム配管補修溶接法試験研究」

(iv) 昭和54年度以降, FWP 小委「高速炉用溶接施工法の確立に関する研究」

これらの調査・研究成果の幾らかは、既に公表されている。

(3) 高速炉及び高温ガス炉などにおいても、高温構造設計が要求され、ASME Code Case N-47 (旧1592)をベースに種々検討されており、溶接継手のクリープ破断強度のみならず、非弾性ひずみ制限規定によりクリープ伸びを規定する必要がある。これらの溶接継手のクリープ特性は母材のそれと同等に確保することが一般に困難であり、継手単軸クリープ特性と内圧クリープ特性は力学的及び材質的要因により両者の相違が見られ、また狭開先アーク溶接や電子ビーム溶接による継手のクリープ特性など試験・研究すべき課題が多い。これらの課題に対して、佐藤、須清らの溶接継手のクリープ性能評価に関する考察は極めて興味深い報告であり、溶接継手のクリープ破断性能を母材のそれと同等にするための溶接金属の許容選択範囲の提案に対して、ステンレス鋼等の各種溶接法、溶接材料、溶接条件による継手の長時間クリープ試験を行い、具体的なクリープデータによる実証が必要であると考える。

終りに、全体の時間の制約があったにもかかわらず、活発な討論によって多くの成果を得たことに對し、ご協力戴いた関係者各位に感謝の意を表します。また、このシンポジウムの講演と討論が、今後の原子力プラントの溶接技術の向上に役立っていくことを期待する次第です。