

# 溶接保全共同研究講座

大阪大学大学院工学研究科  
溶接保全共同研究講座

亀山 雅 司

## 1 はじめに

近年、世界規模で増大するエネルギーを確保すると共に CO<sub>2</sub> 排出量の低減など環境にも配慮したエネルギー供給の確保が課題となっている。現在、世界の 1 次エネルギーの供給は約 80% を化石燃料に依っており、化石燃料以外では薪、水力等が約 13%、原子力が約 6% となっている (IEA KeyWorld Energy Statistics 2008)。このため、非化石燃料の新エネルギーの開発が期待されているが、実用化にはまだ時間を要し、大規模かつ安定的にエネルギーが供給できる当分の人工的な手段は原子力発電しかないのが実情である。そのため、世界的に原子力発電への期待と新規建設の機運が高まっている。

このような状況下、国内でも国内の 1 次エネルギーの約 15% を担う原子力発電設備に注目が集まっている。しかしながら、発電所の建設は長いリードタイムを要し、短期間に発電所を増やしていくことは容易ではない。発電電氣量を短期間で増やすには既存の原子力発電設備の有効利用に負うところが多く、暫くはこの傾向が続くと思われる。

また、国内の原子力発電所は建設後 30 年以上経つ高経年化プラントの割合が増えつつあり、安全確保及び安定運転のための高経年化評価技術の推進が図られている。これまで高経年化対策は検査・評価の整備が先行しており、設備の稼働率（企業収益）に関連が深い補修については産業界の自助努力に委ねられているところが多い。一方、国内の原子力発電設備は海外に比べ、トラブル等で計画外停止が発生すると停止期間が長期化する傾向があり、停止期間を短縮するのに有効な補修技術開発等による稼働率の向上が必要である。環境保全や 2008 年に見られたエネルギー価格の急上昇等を考慮すると、稼働率の向上は企業側のみの問題に止まらず、社会的にも可及的速やかに対処すべき課題である。なお、補修技術の確立に当たっては、規制と整合する必要があるため、取組みは産主体であると

しても、実機で効力を発揮するためには、検査や評価と同様、官・学からの視点も必要である。

また、原子力発電設備は溶接構造が多く使用されていることから、補修技術に関しては溶接を中心とした技術開発が重要な要素になると考えられる。そこで当共同研究講座では、原子力発電設備を前提とした補修等の溶接技術と関連事項の検討、開発を行っている。

## 2 原子力発電設備の溶接の制約と研究の目的

原子力発電設備といえば放射線による特殊技術を連想される方も多いが、加圧水型原子炉 (PWR) では、金属組織に影響があるのは核燃料を装荷する原子炉容器の一部分、溶接性に影響がある部分は、核燃料の極近傍の炉内構造物に限られている。また、炉内構造物は一体取替技術が確立されていて国内で実績もある。総じて、原子力発電設備の溶接の制約は作業環境（被ばく）と熱処理条件に負うところが多い。

具体的には、加圧水型原子炉の場合、炉内の圧力は約 17MPa あり、約 200mm の低合金鋼で製作されている。低合金鋼の溶接には熱処理が必要であるが、既に現地に搬入・据付された状態で原子炉容器の一部を加熱して、法規や規格基準により規定された必要な範囲を必要な温度まで昇温することは難しい。

また、製造時に想定していない欠陥（劣化）を補修するためには、製造時に想定していない新たな対策検討が必要となる可能性がある。例えば、応力腐食割れが発生した部位を削除、復旧する溶接は現状の構造に復帰させるだけでなく、応力腐食割れの防止の機能を付加する必要がある。

このように、補修に用いる溶接技術を確立するためには、溶接施工時の現象を応力、材料科学的手法に焦点を当てた研究等により明らかにする必要がある。以下に現在取り組んでいる 3 つのテーマについて記載する。

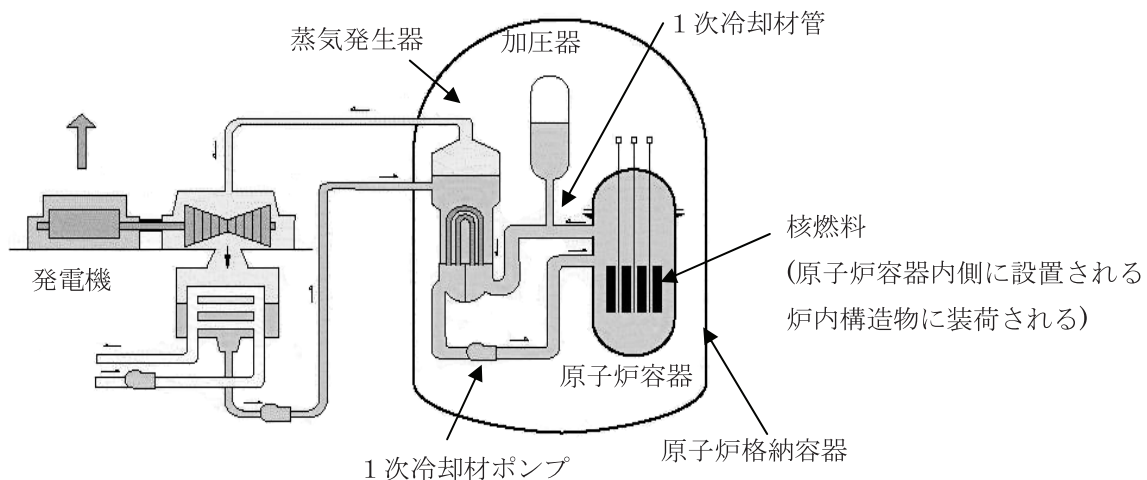


図1 原子力発電設備(PWR)の設備構成

### 3 テンパービード法による溶接過程での組織変化と残留応力低下挙動

原子力発電プラントの低合金鋼製圧力容器の予防保全・補修を目的とした溶接において、適用箇所によっては溶接後のPWHTの代替手法としてテンパービード法の採用が認められている。テンパービード法では多層の溶接パスの熱履歴を利用し、溶接のままの状態での溶接部の組織改善及び残留応力を低減することを可能としている。しかしながら、実機に対するテンパービード法の適用は米国で多くの実績があるものの、日本においてその適用実績はあまり多いとはいえない。今後、テンパービード法の有効性をさらに詳細に明確化することにより、この手法による溶接補修がより広範な対象に適用可能となることが考えられる。

そこで、テンパービード法による金属組織の改善効果及び残留応力の低減効果を詳細に解析することにより、この手法の有効な溶接施工条件を明確化することを目的として、以下に示す研究項目について検討を実施する。

#### (1) 応力除去焼鈍過程におけるテンパー現象の定量的解析

原子力プラント圧力容器用低合金鋼の溶接熱影響部を対象とし、溶接後450～700℃の温度範囲での焼鈍過程の組織変化並びに硬さ変化を調査する。この結果に基づき、焼鈍過程のテンパー効果を定量的に評価する速度式を提案する。

#### (2) 溶接熱サイクル過程における組織改善効果の解析

低合金鋼の溶接熱影響部を対象とし、溶接後450～700℃の温度範囲での焼鈍過程のテンパー効果を定量的に評価する速度式を熱サイクル過程に拡張す

ることにより、溶接熱サイクル過程でのテンパー効果を予測する手法の確立を行う。

#### (3) テンパービード法による溶接熱サイクル過程における残留応力低減挙動解析

熱サイクルパラメータを変化させた溶接熱サイクル過程における残留応力低減挙動を解析し、残留応力低減に有効な溶接条件の明確化を行う。

#### (4) 予測手法により決定されたパラメータを用いたテンパービード法による有効性の検証

上記検討により得られた予測手法により決定した溶接パラメータを用いたテンパービード法を適用した際の残留応力改善効果及び組織改善効果を実験により検証する。

### 4 溶接部表面残留応力低減手法の長期有効性検証

原子力発電プラントの応力腐食割れ対策の方策として溶接部に対する表面残留応力低減手法が有効であり、表面機械研磨法、超音波ピーニング法、ウォータージェットピーニング法、レーザーピーニング法などが実機採用されている。これらの表面残留応力低減手法では表面からある深さまでの引張残留応力の低減もしくは圧縮応力化出来ることが知られており、応力腐食割れの防止に有効と考えられる。これらの表面残留応力低減効果が運転温度での供用下においても持続的な有効性は原子力発電プラントの運転温度は約300℃付近にあり、プラント構成材料であるステンレス鋼やニッケル基合金ではクリープに伴う応力緩和は生じにくいことが前提となっている。しかし、これらの表面残留応力低減手法により処理されたプラントの長期にわたる供用下の健全性を維持するためには、処理後の溶接

部の表面残留応力状態の挙動を明確化することが必要であり、また、供用下での溶接部の表面残留応力状態の経時変化を明確化できれば、表面残留応力低減手法の有効期間が明らかとなり、計画的な保全の決定にも有効である。

本研究では各種表面残留応力低減手法を用いた溶接部の表面残留応力の原子力プラント供用下温度における挙動を予測する手法の確立を目的とし、以下に示す研究項目について検討を実施する。

#### (1) 溶接部の表面残留応力分布の解析

原子力プラント構成材料の溶接部を対象とし、表面及び内部残留応力分布を解析すると同時に実験により残留応力分布を計測し、その妥当性を検証する。

#### (2) 恒温熱処理過程における表面残留応力挙動の解析

原子力プラント構成材料の溶接部を対象とし、溶接後300～600℃の温度範囲での熱処理過程における表面残留応力の変化を調査する。同時に、残留応力分布の存在下での表面残留応力の挙動を解析により求め、その妥当性を評価する。これらに基づき表面残留応力低減手法を適用した溶接部の残留応力低減効果を確認する。

#### (3) 実機再供用下における表面残留応力低減手法の長期有効性の検証

上記検討により得られた予測手法により決定した残留応力低減効果を加速試験により検証する。

### 5 PWHTによる溶接継手の残留応力、組織改善に及ぼす影響評価

原子力発電プラントの低合金鋼製圧力容器等主要機器の予防保全・補修を目的とした溶接を行った後に、組織改善及び残留応力低減等を目的として溶接後熱処理(PWHT)が施されているが、それらの影響を定量的、材料科学的に扱う研究はまだ少ない。また、原子力発電プラントの主要機器には低合金鋼、ステンレス鋼、高ニッケル基合金等の異材継手を使用されているが、異材継手は溶接後熱処理によって残留応力が上昇するという報告もあるため、溶接継手の残留応力、組織改善に向けたPWHTの影響評価が重要である。

本研究では異材継手の溶接後熱処理について、残留応力の解析、組織等の材料化学的検討による影響評価手法の確立および残留応力、組織改善を目的として、以下に示す研究項目について検討を実施する。

#### (1) 同材および異材におけるクリープ特性の検討およびモデル化

低合金鋼、ステンレス鋼それぞれのクリープ則について基本的なクリープ特性の把握、モデル化の検討を行う。また、実験により検討結果の妥当性を検証する。

#### (2) 同材および異材溶接継手の溶接後熱処理における熱弾塑性クリープ解析の検討

同材および異材溶接継手の残留応力挙動を熱弾塑性クリープ解析で検討する。また、実験による解析結果の妥当性検証方法を検討する。

#### (3) 溶接後熱処理における組織影響の評価手法検討

溶接継手の溶接後熱処理について、材料科学的な検討を行い、組織・残留応力の相関等、評価手法の検討を行う。

#### (4) 画像解析によるクリープひずみのその場観察手法の開発

デジタルカメラを用いた溶接時における変位挙動の測定法の適用により、溶接後熱処理のその場観察によるクリープ則の取得、解析への反映による可視化技術などの開発検討を行う。

#### (5) 溶接後熱処理における溶接継手改善条件の検討

(1)～(4)を踏まえた溶接後熱処理における溶接継手の残留応力、組織改善条件の検討を行う。

### 6 終わりに

当講座は平成20年10月から3年の予定で活動を開始し、現在、ニーズ等の調査、研究計画を終え、具体的な研究に着手した。当講座は、マテリアル生産科学専攻 生産プロセス講座 複合化プロセス工学領域の西本和俊教授から主に材料科学について、また、マテリアル生産科学専攻 構造化デザイン講座 構造化設計学領域の望月正人教授から主に構造・応力に関して共同研究体制を取り、研究を推進している。すなわち、溶接は母材と異なる材料、応力の両者の大きな変化を受けるため、これらを平行に検討できる恵まれた研究体制にある。具体的な研究成果が得られるのは主に来年度以降になるが、社会の基盤を担う発電設備の安全確保に有効な技術開発成果が得られることを期待したい。

(溶接 昭和63年卒 平成2年前期)