

CRD スタブチューブ溶接部の封止溶接技術の開発

Development of Seal Welding Repair Technology for CRD Stub-tube

日立GEニュークリア・エナジー(株) 田中 賢彰 Masaaki TANAKA

日立GEニュークリア・エナジー(株) 伊東 敬 Takashi ITO Member

バブコック日立(株) 松本 耕一 Koichi MATSUMOTO

バブコック日立(株) 馬原 陽一 Yoichi MAHARA

Seal welding is a repair method when crack by Stress Corrosion Cracking (SCC) is found in weld portion of core internals including pressure boundary component in nuclear power plant. Seal welding is welded directly on surface of existing SCC crack and prevents SCC propagation by isolating SCC crack from reactor water environment. In this study, development of seal welding technology using automatic TIG Welding was executed, and the applicability of seal welding method to CRD stub-tube weld portion was confirmed by examination of full scale weld test and analysis.

Keywords: Seal welding, SCC, CRD Stub-tube, TIG Welding, Embedded SCC

1. はじめに

近年、国内沸騰水型原子力発電プラント(以下、BWR)の原子炉構成機器の高ニッケル合金製の、溶接金属において応力腐食割れ(以下、SCCと略す)によるき裂が顕在化しつつある。SCCは、SCC感受性が高い材料に、製造時の表面硬化層の形成(SCC感受性増加)や溶接による残留応力が重畠し、発生・進展するものと推測され、SCC発生の可能性がある部位については、ウォータージェットピーニング^[1]による表面応力改善などの予防保全を積極的に推進している。一方、万一SCCが確認された場合、SCCき裂の大きさに基づく健全性評価を実施し、必要に応じて適切な補修工法を選択する必要がある。

SCCの補修工法としては、放電加工や研削加工によるひび除去、あるいは取替えなどの「き裂を完全除去する補修工法」が従来適用されてきたが、深いひびの除去は難しく、また取替え工法は大掛かりな工事が必要になる。このため、取替え工法に比べて短期間での補修が可能等のメリットが期待できる封止溶接工法(SCCき裂を残したまま直接肉盛溶接を行い、SCCき裂を炉水環境から遮断する工法)の実機適用ニーズが高まっている。

このような背景のもと、BWR炉底部の耐圧バウンダリを構成するクラス1機器の代表として、高ニッケル合金製の制御棒駆動機構(CRD)スタブチューブ取付溶接部を対象にした封止溶接技術の開発及び封止溶接工法の技術的妥当性を確認した。

連絡先：田中賢彰,〒319-1221 茨城県日立市大みか町5丁目2番2号,日立GEニュークリア・エナジー(株),電話:0294-55-5165, E-mail:masaaki.tanaka_xs@hitachi.com

2. 封止溶接工法の概要

2.1 封止溶接工法の特徴

封止溶接工法は、図1に示すように、SCCを残したまま、SCCによるき裂の開口を直接肉盛溶接で覆うことによって、非貫通き裂に対してはSCCき裂を炉水環境から遮断することによるSCC進展の抑制、また貫通き裂に対してはSCC進展阻止に加えて炉水の漏えいを防止し、機器の構造健全性及び機能を確保・維持する補修工法である。(耐圧バウンダリの貫通き裂に適用する場合、「機器自身の構造強度」と「封止溶接部の漏えい防止」により、耐圧バウンダリ機能を確保し、機器全体の機能を損傷以前と同等に確保できると考える。)なお、炉水環境からの遮断によりSCC進展が抑制され、SCCによるき裂進展量はごくわずかで、無視できることから、封止溶接後のき裂進展は疲労き裂進展のみを考慮する。

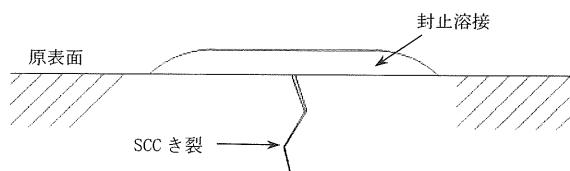


Fig.1 Outline of seal welding method

2.2 封止溶接工法適用の前提条件

BWR炉底部機器(クラス1機器)の耐圧部に封止溶接を適用する場合の主な前提条件を下記に示す。

- 1)き裂部分を除いた機器の残存部分のみで、圧力や外荷重に対して機器の構造強度及び安全機能を確保できること。

- 2)溶接施工面（開先面）には、補修対象き裂以外に、溶接に悪影響を及ぼす有害な異物等がないこと。
- 3)フェライト鋼に接合された高ニッケル合金に適用する場合は、既設の溶接金属の厚さが、封止溶接時の熱影響をフェライト鋼に与えない厚さ4mm以上に確保されていること。

2.3 封止溶接部構造

封止溶接部の構造および施工範囲を図2に示す。封止溶接は、自動ティグ溶接により実施することとし、SCCの範囲(欠陥の長さ、深さ)を把握し、疲労き裂進展評価に基づき評価した「必要厚さ」および「有効施工長さ」の範囲を包絡するように溶接施工する。なお、封止溶接の溶接積層数は3層以上、溶接厚さは3mm以上とした。

封止溶接部の必要厚さ(最小封止溶接厚さ: t_w)は、内圧等の荷重に対し封止溶接部の構造強度確保に必要な厚さ(t_a)に、評価期間末期における封止溶接厚さ方向の疲労き裂進展量(Δa)を加えた厚さとする。また、有効施工長さは、疲労き裂進展量を考慮した評価期間末期の欠陥予測長さに、必要溶接長さを加えた長さとする。

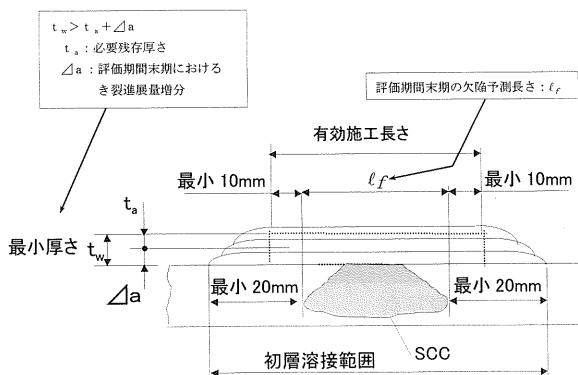


Fig.2 Outline of seal welding design and requirement

3. 封止溶接部の技術的課題と確認方法

3.1 封止溶接工法の実機適用手順の概要と確認事項

封止溶接工法の実機適用手順の概要と、CRD スタブチューブ溶接部への封止溶接工法の適用にあたって、確認すべき事項を図3に示す。実機適用手順としては、SCCが確認された後、封止溶接の適用性評価(強度評価)を行い、き裂残存でも構造強度が確保されていると判断されれば、封止溶接補修を行い、継続検査を行うことを条件に、評価期間内の運転が許容される。

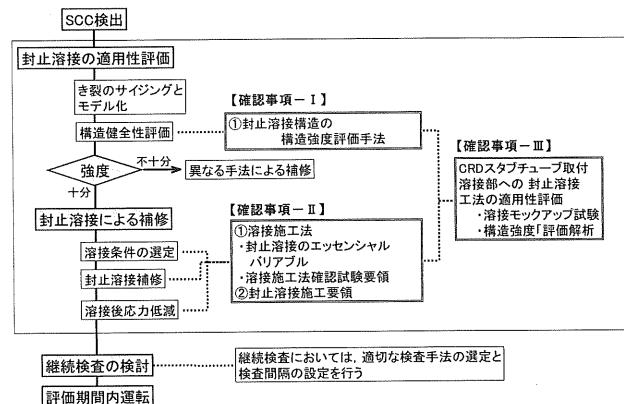


Fig.3 Outline and check items of seal welding application procedure

3.2 構造強度評価手法に関する確認事項(確認事項-I)

封止溶接工法に関しては、構造強度評価として、下記2項目を評価する必要がある。

(1)構造物全体の評価

- ・き裂が存在しても、構造物全体が崩壊しないこと（封止溶接適用の前提条件）

(2)封止溶接部の評価（環境遮断機能の確保）

- ・疲労き裂進展により、き裂が封止溶接部を貫通しないこと。
- ・封止溶接部が内圧・外荷重で破壊しないこと。

封止溶接工法の適用に当たっては、検出されたき裂に対する構造強度評価を実施する必要があり、この構造強度評価は、基本的に日本機械学会維持規格に基づいて行う。維持規格の基本的な評価手法は高ニッケル合金にも適用可能と考えられるが、高ニッケル合金の疲労き裂進展速度式や破壊評価手法については整備されていないため、新たな評価手法を策定する必要がある。

上記を踏まえ、表1に示す封止溶接構造の構造強度評価手法を策定した。

Table.1 Method of structural strength evaluation

評価項目	評価手法	封止溶接工法の構造強度評価手法
封止溶接厚さの設定	最小厚さの設定方法	最小厚さの設定方法を規定。
き裂進展解析	疲労き裂進展速度	インコネル600系合金の大気中疲労き裂進展速度式を策定。
	応力拡大係数(K値)の計算方法	有限要素法により求めたJ積分値からK値を算定する方法を規定。
破壊評価	機器の破壊評価方法	2倍勾配法による破壊評価を規定。
	封止溶接部の破壊評価方法	梁モデルによる一次応力評価、弾塑性解析による評価(CTOD法)を策定。

3.3 封止溶接に関する確認事項(確認事項-II)

封止溶接はき裂(ギャップ)を有する面に溶接を行うが、き裂の開口幅は小さく、溶接施工性の観点から、封止溶接の溶接自体は通常のティグ溶接による肉盛溶接と有意な相違はないと考えられ、適切な溶接条件の選定により、十分安定した溶接施工が可能であると考えられる。しかし、き裂が封止溶接に与える影響及び封止溶接がき裂に与える影響を評価し、き裂を有する面への健全な溶接施工が可能であることを確認しておく必要がある。

このため、溶接施工の確認事項(エッセンシャルバリアブル)を溶接試験に基づいて策定するとともに、実機施工にあたって必要となる溶接施工法確認のための試験要領、及び封止溶接施工管理要領の策定を行った。

表2に、溶接性に関して実施した主な確認試験項目を示す。各試験においては、外観検査、液体浸透探傷検査(PT)、断面マクロ・ミクロ試験、側曲げ試験、硬さ試験を行い、健全な封止溶接施工ができるることを確認した。

Table 2 Examination items of seal welding

確認試験	対策方法 又は 確認方法
1 適正溶接条件確認試験	き裂を模擬した放電加工スリット試験体を用いて、健全な溶接ビード形成が可能な適正溶接条件の範囲を確認
2 溶接姿勢の影響確認試験	溶接姿勢(下向き、横向き、立向き、上向き)の影響を確認
3 き裂内在物の影響確認試験	き裂内に残存する可能性のある内在物を含ませたスリット試験体を用いて、内在物があっても健全な溶接が可能であることを確認
4 SCC予き裂への影響確認試験	SCC予き裂先端において、封止溶接時のひずみによる延性き裂進展が生じていないことを確認
5 手直し溶接部の健全性確認試験	溶接不良が生じた部分をグラインダで部分的に除去し、手直し溶接を行い、同一箇所を3回繰り返し手直しても、手直し溶接部が健全であることを確認

溶接試験の結果に基づき、策定した溶接条件、溶接施工法確認試験要領及び封止溶接施工管理要領の概要を下記に示す。

- (1)溶接条件(エッセンシャルバリアブル)を表3に示す。なお、溶接方法は、気中環境下での自動ティグ溶接とし、封止溶接材料は耐SCC性に優れたインコネル82とした。表3の溶接条件範囲における標準溶接条件で、SCCき裂に封止溶接施工した試験体の断面写真を図4に示す。
- (2)溶接施工法確認試験要領については、溶接規格第2部のクラッド溶接の溶接施工法確認試験要領に準拠するとともに、内圧等に対する封止溶接部の強度担保の観点から、封止溶接部の溶接金属の引張試験を追加で規定した。

(3)封止溶接の施工ステップを図5に示す。封止溶接部の検査としては、最終溶接後PTに加え、初層溶接でSCCき裂を健全に封止したことを見認するため、初層溶接後にもPTを実施することとした。なお、開先面検査は、き裂残存が前提であることから、開先面の液体浸透探傷検査(PT)は実施せず、封止溶接対象のき裂以外のき裂、異物、汚れ等がないことを目視確認することとした。

また、封止溶接後、ウォータージェットピーニング(WJP)による封止溶接部近傍の残留応力改善、及び耐圧試験を実施することを含め、封止溶接施工管理要領を策定した。

Table 3 Seal weld conditions

項目	適用条件
(1)母材	P-43
(2)シールドガス	アルゴンガス
(3)溶加材	R-43 (82合金)
(4)電極数	1
(5)溶接機	自動TIG溶接機
(6)積層数	多層(3層以上、溶接厚さは3mm以上)
(7)母材の厚さ	制限なし
(8)溶接条件	溶接入熱量: 5.4~14.8kJ/cm ワイヤ供給速度: 300~1250mm/min
(9)手直し溶接	同一箇所での手直し溶接は3回以内とすること。

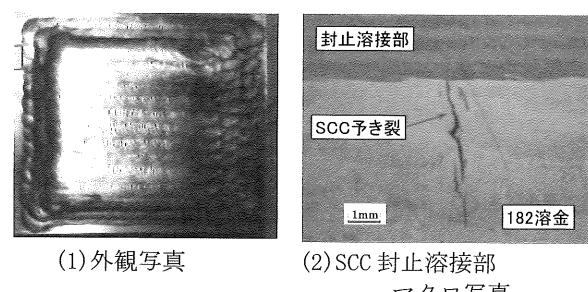


Fig.4 3 layer seal welding test result

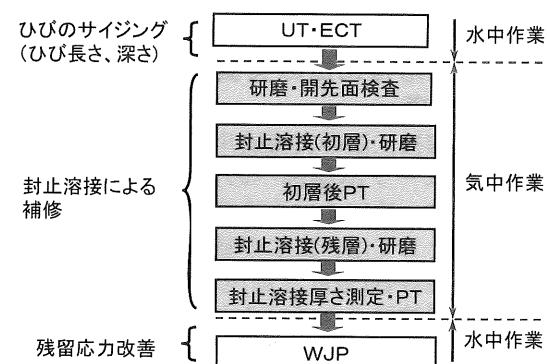


Fig.5 Seal welding procedure

4. CRD スタブチューブ溶接部への封止

溶接適用性確認(確認事項-II)

封止溶接に関する溶接施工管理要領及び構造強度評価手法に基づき、CRD スタブチューブ溶接部への封止溶接適用性を確認した。

4.1 CRD スタブチューブ溶接部の補修方法

BWR 原子炉圧力容器の炉底部機器の補修においては、原子炉建屋のオペレーションフロアから、遠隔操作で補修する必要があり、図 6 に示す完全気中補修工法を適用する。完全気中補修工法は、原子炉圧力容器法兰部及び炉心シラウド上に遮蔽体を設置後、炉水を抜き、炉内を完全気中の状態にした状態で、炉底部機器の補修を遠隔自動で行なう工法であり、気中環境での溶接補修とすることで、補修溶接の品質・信頼性の向上、各補修装置の設定時間短縮等による工事期間短縮が可能となる。

また、CRD スタブチューブ溶接部の 3 次元形状に対応可能な補修装置(研磨装置、封止溶接装置)及び検査装置(PT 装置、寸法測定装置)を開発した。開発した封止溶接装置を図 7 に示す。

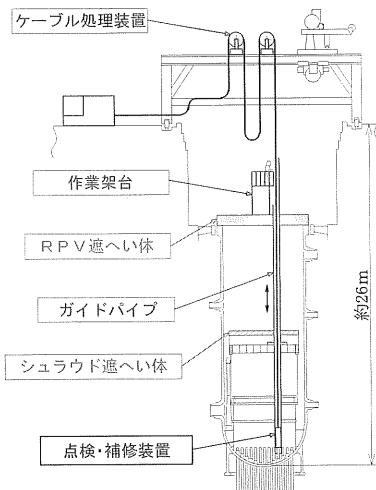


Fig.6 Outline of air environment repair method

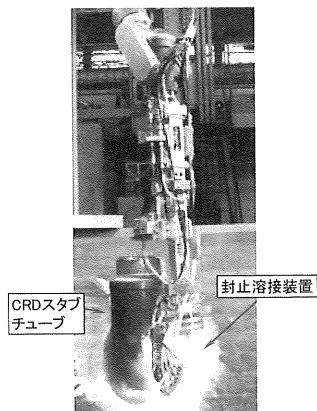


Fig.7 Seal welding machine for CRD Stub-tube

4.2 溶接モックアップ試験結果

最外周の CRD スタブチューブ取付溶接部を模擬したモックアップ試験体(SCC き裂付与)に対して、封止溶接施工管理要領に従った封止溶接確認試験を実施した。図 8 に SCC き裂付与部への 3 層封止溶接施工後の外観写真、断面マクロ試験結果の一例を示す。モックアップ試験の結果、SCC き裂に対して封止溶接施工が可能であること、封止溶接部も健全であることを確認し、CRD スタブチューブ取付溶接部に健全な封止溶接施工が可能であることを確認した。

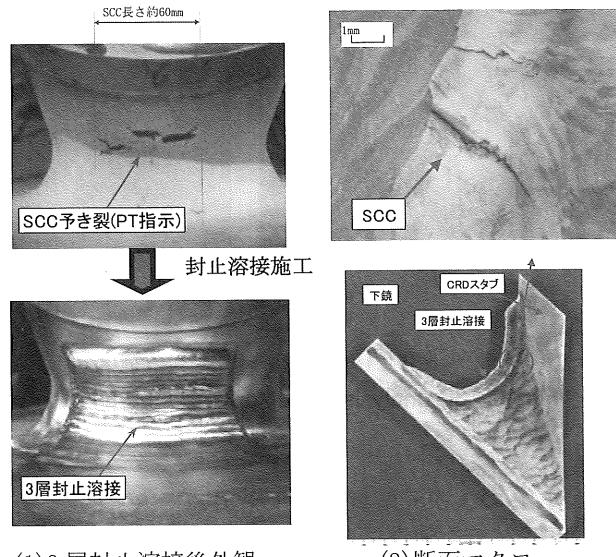


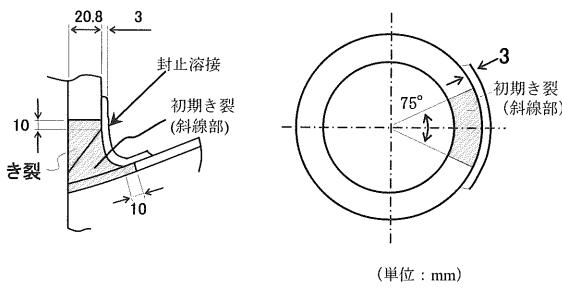
Fig.8 Example results of full scale seal welding test of CRD stub-tube

4.3 CRD スタブチューブ溶接部の構造強度評価結果

CRD スタブチューブ取付溶接部の構造評価においては、取付溶接部に、軸方向貫通き裂及び周方向貫通き裂を複数箇所に想定した解析モデルを作成し、策定した構造強度評価手法に基づき強度評価を実施した。以下、代表として、山側に想定した貫通き裂に関する解析結果の一例を示す。

(1) 解析モデル

図 9 に、想定した軸方向及び周方向貫通き裂の位置及びき裂の範囲を示す。また、図 10 に軸方向貫通き裂を付与し、厚さ 3mm の封止溶接部をモデル化した 3 次元解析モデルを示す。



(1) 軸方向貫通き裂 (2) 周方向貫通き裂
Fig. 9 Assumed crack in CRD stub-tube for structural analysis

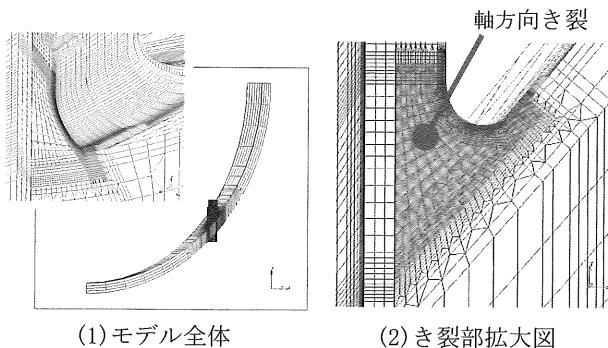


Fig. 10 3D analysis model for CRD stub-tube

(2) 疲労き裂進展評価

図 10 の 3 次元解析モデルを用いて、内圧及び外荷重に対する弾性応力解析を実施し、き裂先端部分における J 積分値を算出し、内面ひずみを仮定して、応力拡大係数に換算した。この応力拡大係数から、各運転サイクルの応力拡大係数変動範囲及び変動回数、及び策定した高ニッケル合金の疲労き裂進展速度式から、封止溶接施工後の疲労き裂進展量を評価した。図 10 に示す軸方向貫通き裂モデルにおける、封止溶接側への疲労き裂進展量を評価した結果の一例を図 11 に示す。

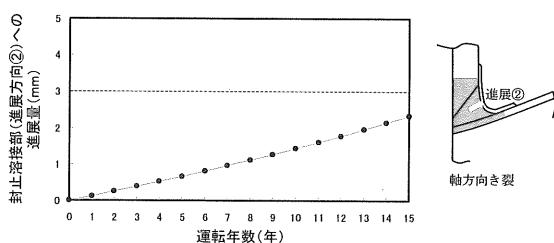


Fig. 11 Evaluated result of fatigue crack propagation to seal welding direction

(3) 破壊評価

外荷重(地震時モーメント)に対して CRD スタブチューブ溶接部が破壊しないことを確認するため、山側に想定した周方向貫通き裂に対して、2 倍勾配法による崩壊荷重を評価した結果を図 12 に示す（なお、疲労き裂進展を考慮して、封止溶

接部残存 1mm まで疲労き裂が進展したモデルで評価した）。

図 12 より、崩壊荷重は内圧及び外荷重に対して十分裕度があることを確認した。

また、山側に想定した周方向貫通き裂について、外荷重作用時のき裂先端開口変位(CTOD)を弾塑性解析により評価し、封止溶接部が内圧及び外荷重によって破壊しないことを確認した。

以上の評価より、仮定したき裂に対して封止溶接構造の破壊強度が確保できていることが確認された。

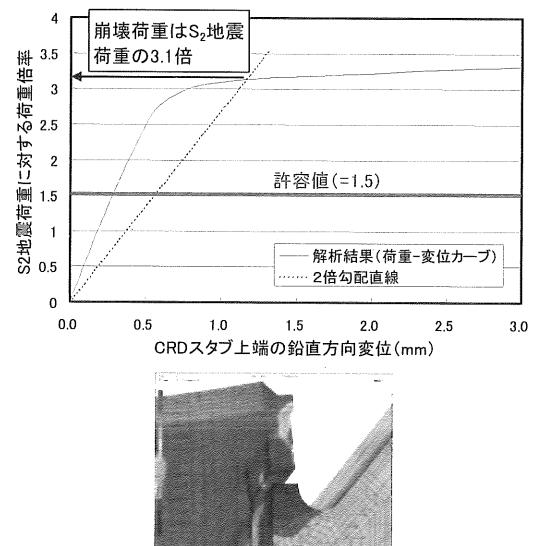


Fig. 12 Evaluated result of collapse load of CRD stub-tube by plastic analysis

5. まとめ

封止溶接工法の技術的妥当性の確認を目的として、BWR の炉底部の耐圧バウンダリ機器である CRD スタブチューブ取付溶接部を代表部位とした封止溶接技術の開発(封止溶接条件、封止溶接施工管理要領、構造強度評価手法の策定)を実施するとともに、CRD スタブチューブ溶接部への溶接試験、構造健全性評価を行い、封止溶接の実機適用性を確認した。

なお、(財) 発電設備技術検査協会において、本 CRD スタブチューブ溶接部への封止溶接適用性に関する確性試験の審議が実施され、「CRD スタブチューブ溶接部の封止溶接工法確性試験」(16 確 S5 号) 確性試験証明書が発行された。

参考文献

- [1] 斎藤、他 6 名、”原子力プラントの炉内機器に対するウォータージェットピーニング技術の開発”、噴流工学、Vol.20、No.1、2003、pp4-12.