

# ショットピーニングを施したニッケル基合金溶接部の熱履歴による圧縮残留応力と耐粒界腐食性の変化

Change of compressive residual stress and intergranular corrosion resistance after thermal history in nickel base alloy welds by shot peening

発電設備技術検査協会  
芝浦工業大学大学院

西川 聡  
大井 浩一

Satoru NISHIKAWA Member  
Koichi OOI Non Member

Shot peening process is countermeasures to prevent stress corrosion cracking in nuclear power plant components. It is necessary to confirm whether the compressive residual stress exerted by stress improvement processes can be sustained under operation environment. In order to evaluate stability of compressive residual stress, the nickel base alloy welded specimen was subjected to thermal cycles 10 times where the peak temperature is 593 K. On the other hand, carrying out shot peening increases the intergranular corrosion resistance of nickel base alloy weld metals.

**Keywords:** Shot peening, Nickel base alloy weld metal, Compressive residual stress, Intergranular corrosion resistance, Thermal cycle, Thermal aging treatment

## 1. はじめに

原子炉の炉内機器に発生する応力腐食割れを予防するため、ショットピーニング等により当該部に圧縮残留応力を付与する場合がある。しかし、実機の高経年化を考える上で、付与した圧縮残留応力が実機の長期間稼働時において持続するのかを明確にしておく必要がある。

これまでに、圧縮残留応力の持続性について種々の検討がなされており、以下の①～⑥の要因に分類することができる。

- ① 熱処理による熱緩和<sup>[1]-[4]</sup>
- ② 応力（ひずみ）付与<sup>[1],[5],[8]</sup>
- ③ 熱緩和と応力（ひずみ）付与との重畳<sup>[3],[5],[9]</sup>
- ④ 溶接残留応力が存在する状態での熱緩和<sup>[3],[4],[7],[10]</sup>
- ⑤ 溶接残留応力が存在する状態での応力（ひずみ）付与<sup>[1],[12]</sup>
- ⑥ 溶接残留応力が存在する状態での熱緩和と応力（ひずみ）付与との重畳<sup>[3],[12]</sup>

これらの要因について、実機の運転条件下、または運転条件の加速条件下において応力改善工法で付与した圧縮残留応力が持続することが示されている。しかし、実機の起動・停止に伴う熱サイクルの付与が圧縮残留応力の持続にどのような影響を及ぼすかを調査した報告は少ない。そこで本研究では、ショットピーニングを施した

ステンレス鋼とニッケル基合金から成る異材溶接継手について、高温純水中で熱サイクルを複数回付与し、そのときの表面残留応力の変化を調査した。

一方、ショットピーニングのような表面に高い塑性変形を付与する工法では、運転温度に保持されたときに粒界析出が促進され、耐粒界腐食性が低下することが懸念される。そのため、ニッケル基合金溶接金属のショットピーニング、および熱時効処理による耐粒界腐食性の変化を調査した。

## 2. 実験方法

### 2.1 溶接試験体の製作

#### 2.1.1 圧縮残留応力の評価試験体

Table 1 に圧縮残留応力の持続性評価試験体に用いた材料の化学成分を示す。母材が NCF600 と SUS316L、溶接金属が 82 合金から成る板厚 25 mm、幅 192 mm、長さ 200 mm の溶接継手をティグ溶接で製作した。溶接条件は、電流 100~200 A、電圧 11 V、溶接速度 1~1.5 mm/s、ワイヤ送給量 0~0.14 g/s とした。溶接継手の余盛と初層部を研削して板厚を 20 mm にした後、余盛研削面の機械加工層を電解研磨により除去し、溶接部を中心に幅 65 mm の領域に Table 2 に示す条件でショットピーニングを施した。そして、オートクレーブを用いて 12 MPa の脱酸素純水中に昇温・冷却速度 0.015 K/s 以下、最高温度 593 K で 7.2 ks 保持の熱サイクルを 10 回付与した。

**Table 1 Chemical composition of the base metal and the filler wire used. (mass%)**

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb+Ta	Ti
SUS316L	0.014	0.48	0.76	0.023	0.001	12.35	17.21	2.83	Bal.	-	-
NCF600	0.04	0.17	0.15	<0.001	0.001	74.79	15.34	-	9.08	-	-
Alloy82 wire	0.03	0.21	2.97	0.003	0.002	74.44	18.83	-	0.52	2.68	0.37

連絡先: 西川聡、〒230-0044 神奈川県横浜市鶴見区弁天町 14-1、一般財団法人発電設備技術検査協会、溶接・非破壊検査技術センター

E-mail: nishikawa-satoru@japeic.or.jp

Out wire size	0.3 mm $\phi$ $\times$ 0.3 mm
Out wire material	SUS304 (Hv500)
Incident angle	90°
Shot time (65 mm $\times$ 200 mm)	160 s
Nozzle size	7 mm $\phi$
Gas pressure	5 kg/cm <sup>2</sup>

### 2.1.2 耐粒界腐食性の評価試験片

板厚 80 mm, 幅 200 mm, 長さ 180 mm の S45C 炭素鋼板上に被覆アーク溶接で 182 合金を厚さ 15 mm 以上 (6 層以上) 肉盛した. 溶接条件は, 電流 140 A, 電圧 24 V, 溶接速度 3.3 mm/s とした. 肉盛溶接試験体に 893 K, 7.2 ks の熱処理を施し, 母材希釈が少ない溶接金属の最終層近傍から板厚 10 mm の試験板を採取した. Table 3 に試験板の化学成分を示す. 表面の機械加工層を除去するため, 最終層の面を 100  $\mu$ m 以上電解研磨し, 幅 15 mm, 長さ 25 mm の試験片を作製した. 15 mm  $\times$  25 mm の電解研磨面に 0.6 mm  $\phi$   $\times$  0.6 mm の炭素鋼カットワイヤを投射速度 60 m/s, カバレッジ 200% でショットピーニングした. その後, 793 K, 0~3.6 Ms の熱時効処理を施した.

Table 3 Chemical composition of the weld metal used. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Nb	Ti	N	O
0.061	0.8	7.07	0.005	0.008	68.3	14.4	7.46	1.53	0.43	0.014	0.039

### 2.2 残留応力測定方法

2.1.1 項の異材溶接試験体の表面残留応力を X 線回折法により測定した. Table 4 に測定条件を示す. また, Fig. 1 に表面残留応力の測定位置を示す. 溶融境界部近傍と溶融境界部近傍から 7.5~10 mm 離れた位置を測定した.

Table 2 Conditions for stress measurement with X-rays.

Material	SUS316L	Alloy 82	NCF600
Radiations/filter	Cr-K $\alpha$ / V	Cr-K $\alpha$ / V	Cr-K $\beta$
Diffraction	Fe- $\gamma$ ; 220	Ni; 220	Ni; 311
Diffraction angle $2\theta_0$	128.4°	130.2°	153.6°
Tube voltage/current	40 kV/ 30 mA		
Irradiated area	0.5 or 2.0 mm $\phi$		

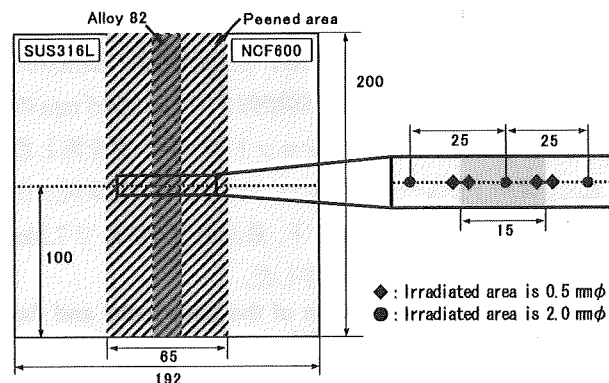


Fig. 1 Schematic of stress measurement points by X-ray diffraction.

### 2.3 耐粒界腐食試験

2.1.2 項の試験片の耐粒界腐食性を沸騰硫酸・硫酸銅腐食試験 (シュトラウス試験) により評価した. JIS G0575 に準拠し, 試験片断面のマイクロ組織を観察して割れ深さを測定し, 深い割れ上位 10 個の平均深さ  $d'$  を求めた.

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 熱サイクル付与による圧縮残留応力の持続性

Fig. 2 に溶接線方向の残留応力を示す. ピーニング後の残留応力は 480~591 MPa で, 熱サイクルを 1 回付与すると -292~-435 MPa に緩和するが, その後は熱サイクルを 10 回まで付与しても大きな変化は見られず, 圧縮残留応力が持続した. Fig. 3 に溶接線直交方向の残留応力を示す. 1 回の熱サイクルで圧縮残留応力は緩和するが, その後 10 回まで大きな変化は見られず, Fig. 2 と同様に圧縮残留応力が持続した. これは, 1 回目の熱サイクル時において, 高温保持に伴う材料の降伏応力低下で応力再配分が生じて圧縮残留応力が緩和するが, 再配分後は同様の熱サイクルに対して圧縮残留応力は安定することが示唆された.

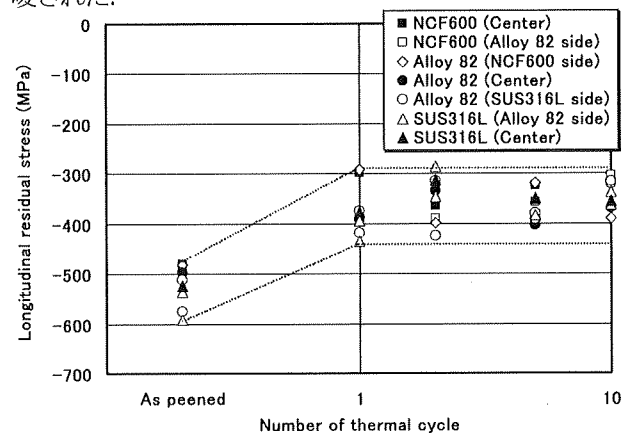


Fig. 2 Effect of number of thermal cycle at 593 K on longitudinal residual stress in dissimilar weld.

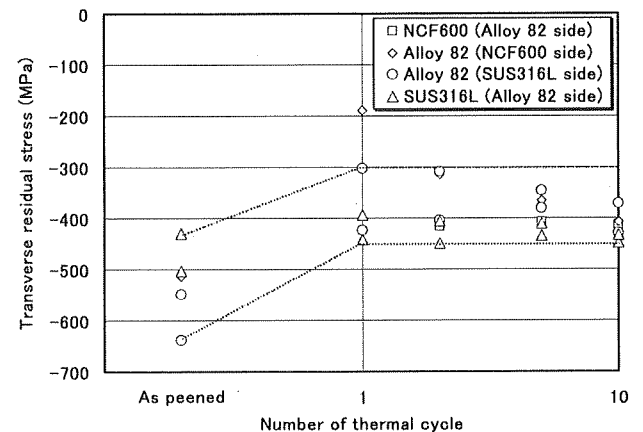


Fig. 3 Effect of number of thermal cycle at 593 K on transverse residual stress in dissimilar weld.

### 3.2 熱時効処理による耐粒界腐食性の変化

Fig. 4 にショットピーニング有無の熱時効処理による  $d'$  の変化を示す。ショットピーニング無しの場合、 $d'$  は  $257 \mu\text{m}$  であり、割れのほとんどは粒界割れであった。熱時効処理時間の経過に伴い割れは深くなる傾向が見られた。これは、粒界 Cr 欠乏層の形成に起因すると考えられ<sup>[13],[14]</sup>、 $893 \text{ K}$ 、 $72 \text{ ks}$  の熱処理後に行った  $793 \text{ K}$  での熱時効処理により Cr 欠乏層の形成が促進されるものと考えられる。そして、ショットピーニングの付与で割れ深さは大幅に低下し、その後の熱時効処理においても割れ深さにほとんど変化は見られなかった。このため、ショットピーニングの付与は耐粒界腐食性を向上させ、その後の熱時効処理においても耐粒界腐食性は持続すると考えられる。ショットピーニング材においても割れが観察されたことから、この割れがショットピーニング時に生じたものか、またはシュトラウス試験によるものかを明らかにするため、ショットピーニングのままにおけるシュ

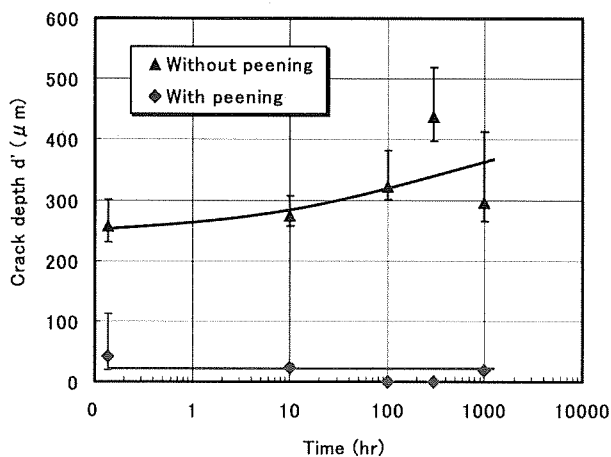


Fig. 4 Effect of shot peening and thermal aging treatment at  $793 \text{ K}$  on crack depth by strauss test in nickel base alloy weld metals.



Fig. 5 SEM micrograph of crack observed in nickel base alloy weld metal as shot peening.

トラウス試験前の試験片について断面観察を行った。Fig. 5 に FE-SEM の観察結果を示す。微小な割れ状の欠陥が観察され、この欠陥はショットピーニングによる加工硬化、および衝撃等により発生したと考えられる。したがって、Fig. 4 に示すショットピーニングを施した試験片で観察された割れは、シュトラウス試験で生じたものではない可能性がある。

ショットピーニングの付与で耐粒界腐食性が向上する理由の一つに、ショットピーニングの衝撃により表面近傍で塑性流動が生じ、Cr 欠乏層が形成された粒界が消失したことが考えられる。今後、TEM 観察等による微細組織観察を行い、耐粒界腐食性が向上した理由を明らかにして行く予定である。

### 4. まとめ

本研究はショットピーニングを施したニッケル基合金溶接部について、①ピーク温度  $593 \text{ K}$  の熱サイクル付与による圧縮残留応力の持続性、② $793 \text{ K}$  での熱時効処理による耐粒界腐食性の変化について調査した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 熱サイクルを 1 回付与すると圧縮残留応力は緩和するが、その後は熱サイクルを 10 回まで付与しても大きな変化は見られず、圧縮残留応力が持続した。
- 2) ショットピーニングの付与は耐粒界腐食性を向上させ、その後の熱時効処理においても耐粒界腐食性の低下はほとんど見られなかった。

### 参考文献

- [1] 小畑稔、久保達也、依田正樹、佐伯綾一、石川達也、“レーザピーニングにより形成した圧縮残留応力の緩和特性評価”、M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集、pp.343-344.
- [2] 齋藤昇、波東久光、吉久保富士夫、守中廉、“WJP による残留応力改善効果の持続性評価”、日本材料学会第 59 期学術講演会講演論文集、2010、pp.307-308.
- [3] 前口貴治、堤一也、豊田真彦、太田高裕、岡部武利、佐藤知伸、“ピーニングによる応力腐食割れ防止効果に関する研究”、日本保全学会第 7 回学術講演会要旨集、2010、pp.568-571.
- [4] 西川聡、中田志津雄、堀井行彦、古村一朗、山口篤憲、“圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動”、日本保全学会第 4 回学術講演会要旨集、2007、pp.276-279.

- [5] 角谷利恵、田澤俊幸、榑崎千尋、斎藤利之、“レーザピーニング施工面の圧縮残留応力に及ぼす外部応力負荷の影響”、M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集、pp.340-342.
- [6] 政木清孝、若林豊、越智保雄、松村隆、佐野雄二、久保達也、“レーザピーニング処理した SUS316L 鋼の高サイクル疲労挙動”、M&M2004 材料力学カンファレンス講演論文集.
- [7] K. Okimura, T. Ohta, T. Konno, M. Narita and M. Toyoda “Reliability of Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation”, Proceeding of the 16<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16, May11-15, 2008, Orlando, Florida, USA.
- [8] 佐川渉、吉久保富士夫、守中康、菅野明弘、波東久光、齋藤昇、“ウォータジェットピーニング (WJP) 技術の BWR 炉内構造物への適用”、保全学、Vol.7, No.4, 2009, pp.69-76.
- [9] 吉村敏彦、大城戸忍、榑本邦夫、守中廉、平野克彦、黒澤孝一、林英策、“ウォータジェットピーニングによる原子炉内機器溶接部の残留応力低減”、日本材料学会第 38 回 X 線材料強度に関する検討会、2001 年 11 月 30 日、pp.38-44.
- [10] 橋本匡史、大沢悠介、伊藤真介、才田一幸、望月正人、西本和俊、“ウォータジェットピーニングによる残留応力低減効果の全施工プロセスを考慮した長期安定性評価”、第 204 回溶接冶金研究委員会資料、2011.
- [11] 田澤俊幸、角谷利恵、榑崎千尋、斎藤利之、“レーザピーニング施工をした溶接部の圧縮残留応力に及ぼす外部応力負荷の影響”、M&M2010 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集、pp.1263-1265.
- [12] 齋藤昇、榑本邦夫、黒澤孝一、守中康、林英策、石川哲也、吉村敏彦、“原子力プラントの炉内機器に対するウォータジェットピーニング技術の開発”、噴流工学、Vol.20, No.1, 2003, pp.4-12.
- [13] N. Saito, S. Tanaka and H. Sakamoto: Effect of Corrosion Potential and Microstructure on the Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Nickel-Base Alloys in High-Temperature Water, Corrosion, 59-12 (2003), 1064-1074.
- [14] 西川聡、“ニッケル基 600 合金溶接部の高温高圧純水中における応力腐食割れ特性と超音波探傷による割れ検出性の向上”、大阪大学工学博士論文、2010、pp.19-55.