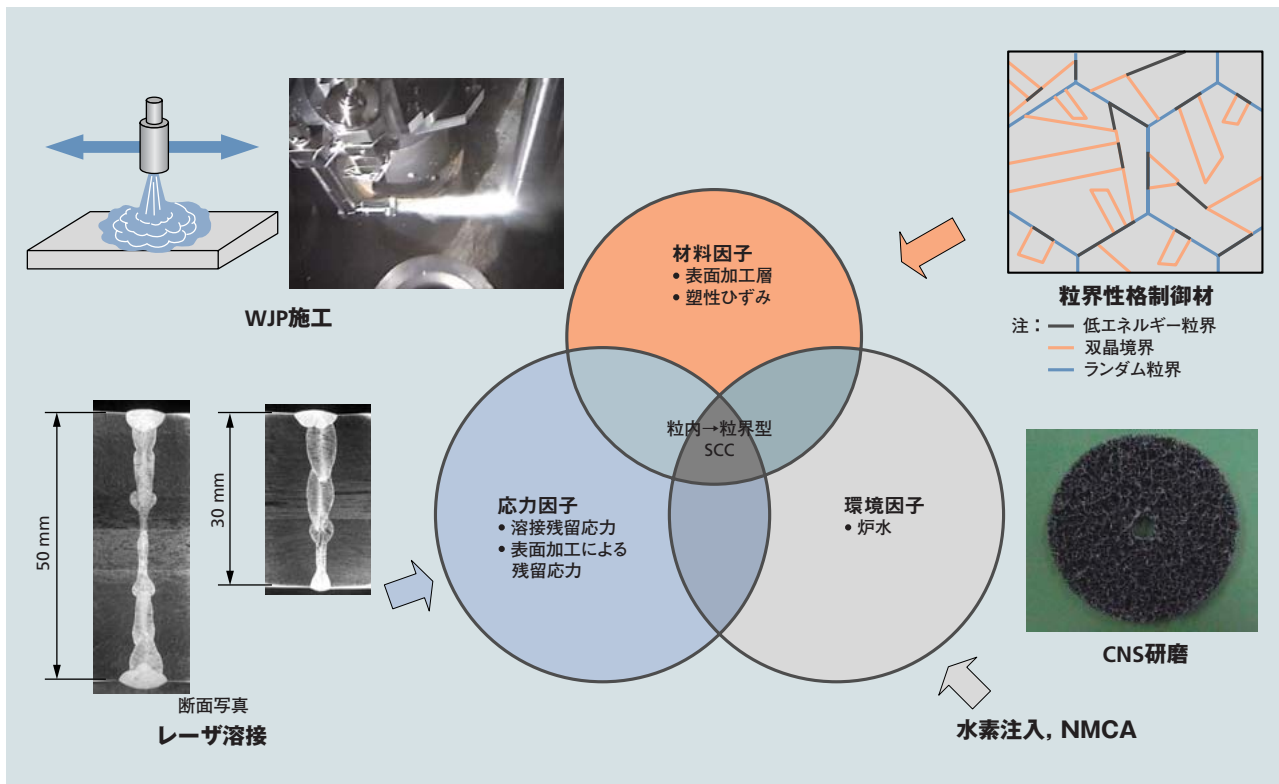


応力腐食割れに対する材料・溶接技術の開発

Hitachi's Activities for Suppression of Stress Corrosion Cracking

越石 正人 Masato Koshiishi
藤森 治男 Haruo Fujimori

岡田 昌哉 Masaya Okada
平野 明彦 Akihiko Hirano



注:略語説明 SCC(Stress Corrosion Cracking), WJP(Water Jet Peening), CNS(Clean N Strip), NMCA(Noble Metal Chemical Addition)

図1 低炭素ステンレス鋼のSCC(応力腐食割れ)要因と対策技術

SCC(応力腐食割れ)の要因と、それに対する対策技術を示す。

炉内機器などのBWR(沸騰水型原子炉)の主要機器にはステンレス鋼やニッケル基合金が使用されており、いずれの材料においてもSCC(応力腐食割れ)事例を経験している。SCC対策はプラント経年化対応における重要な課題の一つであるため、日立はSCC発生を抑制する対策技術の開発を進め、長年にわたりプラントに適用してきた。

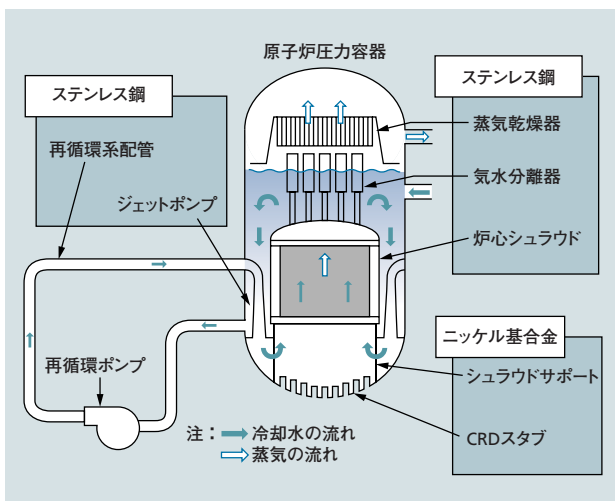
SCCに対する最近の取り組みとして、非鋭敏化SCCの要因解明を進めるとともに、対策技術の有効性を確認している。また、機器構造物の健全性評価に必要なSCC進展速度データの取得など、SCC特性の評価をはじめ、SCCの抑制が可能な新材料の開発を進めている。この結果、加工層除去技術などの有効性を確認するとともに、SCC抑制効果が期待できる粒界性格制御材を開発した。

さらに、高品質で高効率な溶接技術としてレーザー溶接の開発を進め、SCC性の改善にも有効であることを確認している。

1. はじめに

BWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)プラントの原子炉炉内機器および再循環系には、ステンレス鋼やニッケル基合金が使用されている。これらの材料は腐食生成物の発生が少なく、強度特性に優れた特性を持つ材料であるが、高い引張応力が作用する部位では、BWR炉水環境条件においてSCC(Stress Corrosion Cracking:応力腐食割れ)が生じる可能性がある。そのため、SCC対策はプラント経年化対応における重要な課題の一つであり、日立はSCC発生を抑制することを目的に、材料・環境・応力面から各種対策技術の開発を進め、長年にわたりプラントに適用してきた。

ここでは、SCC要因の解明と材料改善として、加工層の影響とその対策技術および新材料の開発状況について述べる。さらに、製造プロセス改善として、レーザー溶接の開発状況についても詳述する(図1参照)。



注：略語説明 CRD (Control Rod Drive:制御棒駆動機構)

図2 BWRプラントの主要機器と使用材料
BWR主要機器における使用材料を示す。

年	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030
BWR形式	BWR-3/4	BWR-5		ABWR			次世代軽水炉
材料	304	304L	低炭素ステンレス鋼 316L/316 (NG)	182/82/600合金	ニオブ添加ニッケル基合金 182M/82M/600M	耐SCC性改良材	
材料および製造プロセス改善		溶接熱管理 冷間加工管理				粒界性格制御材など	
	304の鋭敏化SCC		316L/316 (NG)の非鋭敏化SCC			最適製造プロセス管理 加工層除去 (CNS研磨など) レーザ溶接	
環境緩和	NWC		HWC	NMCA		On-line NMCA	
応力改善		IHSI		WJP		ReNew*	
評価	SCC発生/進展試験					試験技術高精度化 維持規格, 炉内構造物など点検評価ガイドライン	

注：略語説明ほか BWR (Boiling Water Reactor), ABWR (Advanced BWR), NWC (Normal Water Chemistry), HWC (Hydrogen Water Chemistry), IHSI (Induction Heating Stress Improvement)
* ReNewは、GE-Hitachi Nuclear Energy Americas LLCが開発した研磨技術である。

図3 BWRプラント材料のSCC対策の経緯

BWRプラント材料のSCCに対する材料、環境、応力面からの取り組み経緯を示す。

2. SCC要因の解明と材料改善

2.1 予防保全技術開発の取り組み経緯

1970年代、ステンレス鋼製配管において、溶接熱影響部の鋭敏化(クロム炭化物析出による粒界でのクロム欠乏)に起因したSCCを経験したことから、低炭素化したステンレス鋼およびニオブ添加によって炭素安定化したニッケル基合金がSCC対策材として開発され、1980年代以降のプラントに採用されている(図2参照)。

しかし、2001年以降、低炭素ステンレス鋼製の炉心シュラウドおよび再循環系配管において鋭敏化を伴わないSCCが発

見され、この対策として表面加工層除去技術や応力改善技術が適用され始めた。

このような状況を受け、日立は非鋭敏化SCCの要因解明を進めて予防保全技術の有効性を確認するとともに、発生寿命やき裂進展速度など、SCC特性の評価技術開発をはじめ、SCCの抑制が可能な新材料の開発に取り組んでいる(図3参照)。

2.2 SCC要因解明と加工層除去技術

ステンレス鋼の表面に機械加工を施すと、極表層には機械加工に伴う再結晶により、粒径0.5 μm以下の微細結晶粒が形成され、その下部には加工によるすべり変形を伴う加工影響層が形成される。これらの微細組織の変化が、非鋭敏化SCCに大きく関与していることが明らかになった^{1),2)}。

BWR炉水模擬環境中で実施したSCC試験(単軸定荷重試験)後の試験片における、SCC割れ深さと表面硬さの関係を図4に示す³⁾。同図から、表面機械加工によって表面硬さが300 HVを超えるとSCC深さが急激に増大することがわかる。

このようなSCC要因である表面加工層を除去する技術として、最近のプラントにおいては、炉心シュラウドなどを対象にフラップホイール研磨、およびCNS (Clean N Strip) 研磨技術が適用されている。

各種表面仕上げを施したSUS316Lの材料組織を、EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) によって分析した結果を図5に示す。荒機械加工(図4中の300 HV以上の材料に相当)、仕上げ機械加工、グラインダ研削を施した後、フラップホイール研磨、CNS研磨の順に仕上げていくと、表面の機械加工層が除去されていく。

また、フラップホイール研磨やCNS研磨を施すと、表面の残留応力が圧縮化され、材料要因と応力要因の二つを同時に改善することができる。

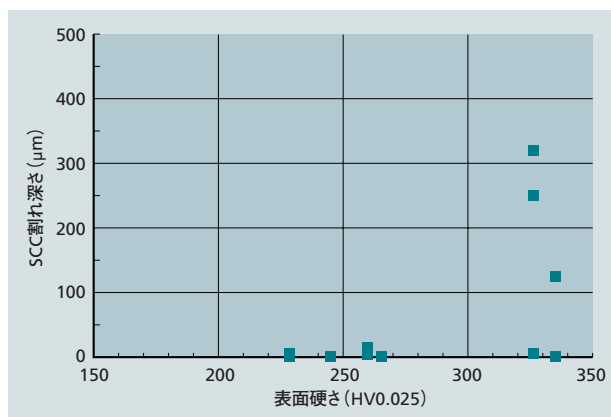


図4 SCC割れ深さと表面硬さの関係

1万時間の単軸定荷重試験後の試験片における、断面観察によって求めたSCC割れ深さと試験片の表面硬さの関係を示す。

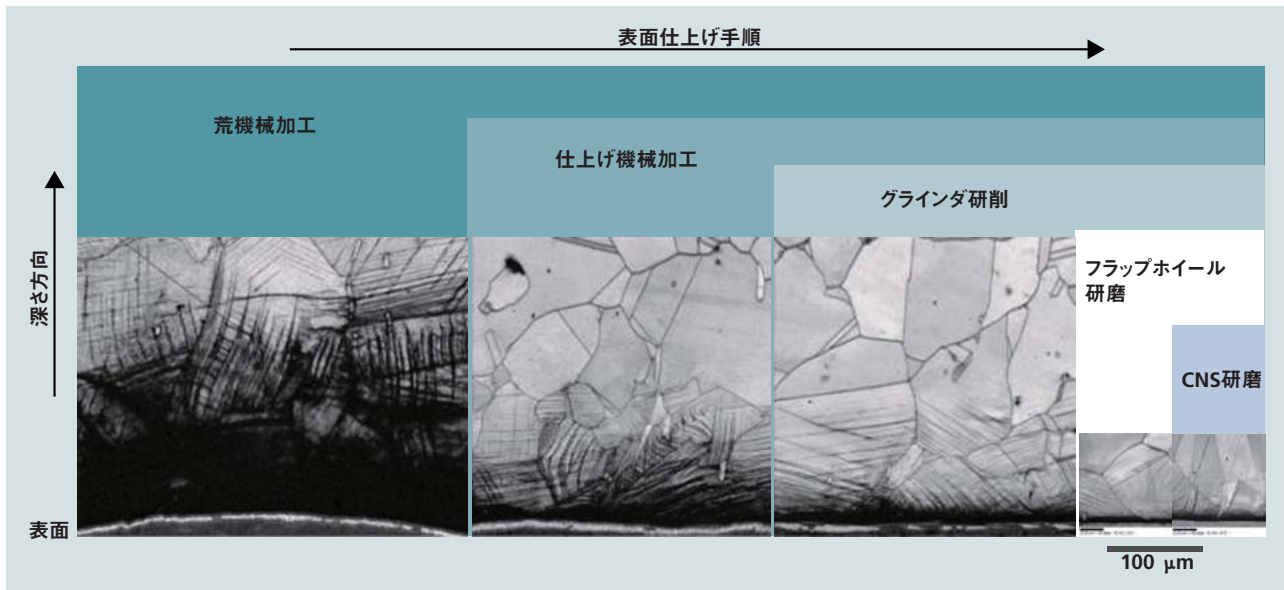


図5 各種表面加工を施したSUS316L表層のEBSD分析結果 (Image Quality)

各種表面仕上げを行った材料の表面近傍の断面組織をEBSD (Electron Back Scattering Diffraction)によって分析した結果を示す。黒色に見える部分が加工層である。前掲した図4の300 HV以上の材料組織は、この図の荒機械加工仕上げに相当する。

2.3 SCC評価技術

予防保全技術の有効性を確認するためには、SCC特性の評価技術が不可欠となる。耐SCC性が向上するほど微弱なSCC性を評価することが必要であり、図4に示した長時間試験(1万時間)などによるSCC発生特性の評価に取り組んでいる。

SCCが発生した場合の機器の健全性評価を目的に、ステンレス鋼およびニッケル基合金のSCC進展速度線図の規格化を民間が、その検証を国が進めている。信頼性の高いデータの取得には、繰返し数を増やして再現性を確認することが必要であり、日立は試験設備の拡充を図って取り組んでいる。また、SCC進展速度への力学的要因の影響評価を目的に、応力拡大係数一定型の試験片の開発も進めている^{4),5)}。

2.4 材料改善(粒界性格制御材)

隣り合う結晶の方位が乱れた粒界(ランダム粒界)では、粒界割れが進展しやすいと考えられる。

粒界性格制御材は、隣り合う結晶が特定の方角関係にある対応粒界の頻度を高めた組織制御材料であり、ランダム粒界の連結を分断し、耐SCC性を向上することが期待される。

試験片に切欠を付与したCBB (Crevice Bent Beam) 試験結果を図6に示す。非制御材に比べて制御材におけるSCCき裂長さは著しく低減されており、また、いずれの材料でも対応粒界における割れが少なく、対応粒界の頻度を高めた粒界性格制御により、SCCの発生・進展を抑制できることが確認された。

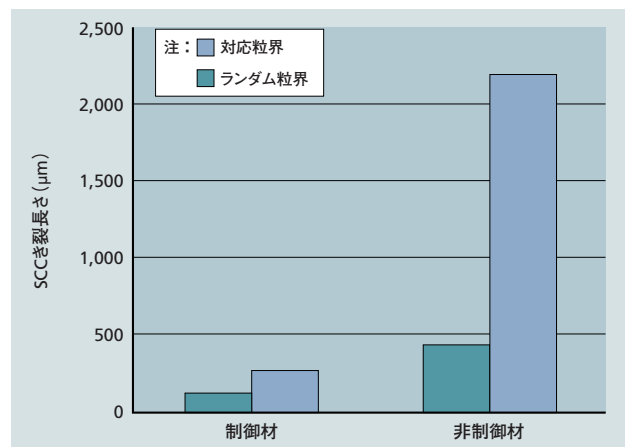
3. 溶接技術

高品質で高効率な製造技術を開発することを目的に、レーザ溶接技術の開発を進めている。このレーザ溶接技術は、SCC要因となる溶接変形(塑性ひずみ)や溶接残留応力を低減する効果も期待できるものである。

3.1 レーザ・アークハイブリッド溶接

ステンレス製品を対象に、YAG (Yttrium, Aluminum, Garnet)レーザ溶接とTIG (Tungsten Inert Gas) 溶接、またはMIG (Metal Inert Gas) 溶接を組み合わせたハイブリッド溶接技術を開発した(図7参照)。

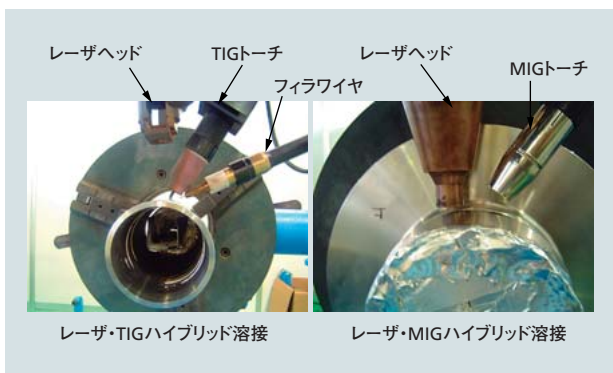
従来工法であるTIG溶接と比較すると、溶接変形量を大幅に低減できることが確認された。現在、高品質の継手が得られることを確認し、製品に適用中である。



注:略語説明 CBB (Crevice Bent Beam)

図6 粒界性格制御材の耐SCC性評価(CBB試験結果)

粒界性格制御材および非制御材SUS316Lの288°C水中2,000時間浸漬による、切欠部SCCき裂長さを比較した結果を示す。



注:略語説明 TIG(Tungsten Inert Gas), MIG(Metal Inert Gas)

図7 レーザ・アークハイブリッド溶接
溶接ヘッド周りの配置関係を示す。

3.2 高エネルギーレーザー溶接

従来よりも高密度のエネルギーレーザー溶接を25 mm以上の厚板に適用することで狭開先化を図り、溶接残留応力を低減できる溶接技術を開発した(図8参照)。

50 mm以上の厚板に適用できることを確認しており、狭開先TIG溶接と比較して残留応力の最大値、引張応力の発生範囲が減少することが確認された。

このことから塑性ひずみを受ける領域も小さくなり、SCC性の改善にも有効と考えられる。

4. おわりに

ここでは、SCC要因の解明と材料改善として、加工層の影響とその対策技術および新材料の開発状況について述べた。さらに、製造プロセス改善として、レーザー溶接の開発状況についても詳述した。

SCC対策はプラント経年化対応における重要な課題の一つであり、日立はステンレス鋼の非鋭敏化SCCの要因解明を積極的に進め、対策技術の有効性を確認してきた。また、粒界性格制御材などの新技術開発にも取り組み、予防保全技術の高度化を図っている。

執筆者紹介



越石 正人

1986年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力サービス部 所属
現在、原子力材料の研究開発取りまとめ業務に従事



藤森 治男

1980年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力サービス部 所属
現在、原子力分野の材料設計および研究開発取りまとめ業務に従事
工学博士
日本原子力学会会員、日本保全学会会員

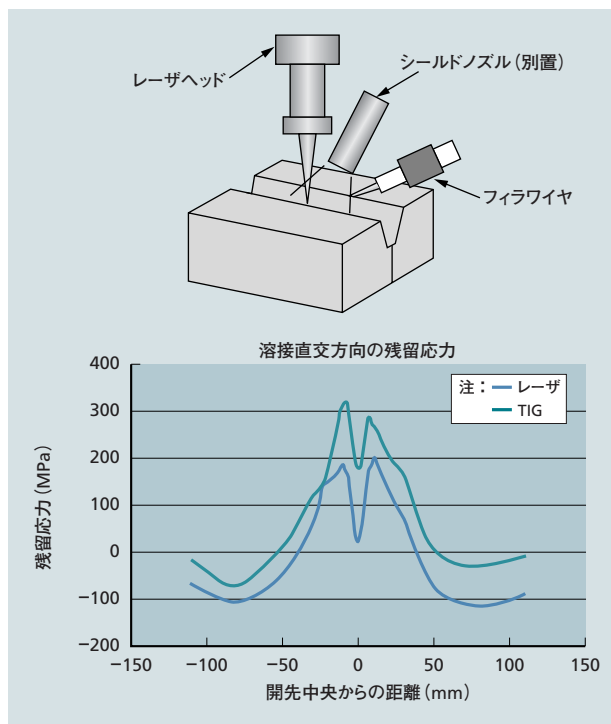


図8 レーザ狭開先溶接後の残留応力の測定結果

ステンレス鋼(50 mm厚板)レーザー狭開先溶接継手とTIG溶接継手表面における溶接直交方向の残留応力を示す。

今後も、GE-Hitachi Nuclear Energy Americas LLCとの共同研究により、BWRプラント材料のさらなる信頼性向上のための技術開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 加藤, 外:第51回材料と環境討論会講演集, A-206, 社団法人腐食防食協会(2004)
- 2) 金田, 外:第55回材料と環境討論会講演集, A-203, 社団法人腐食防食協会(2008)
- 3) M. Koshiishi, et al.:Workshop on Cold Work on Iron- Nickel-Base Alloys Exposed to High Temperature Water Environments, June 3-8(2007)
- 4) 青池, 外:日本機械学会九州支部大会第59期総会講演集, A33, 日本機械学会(2006)
- 5) 丸野, 外:日本機械学会2006年度年次大会講演論文集, Vol.1, 3967, P.929, 日本機械学会(2006)



岡田 昌哉

1993年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力製造部 所属
現在、溶接技術の研究開発取りまとめ業務に従事
溶接学会会員



平野 明彦

1988年日立製作所入社、日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属
現在、原子力材料および強度に関する研究開発取りまとめ業務に従事
日本原子力学会会員、日本機械学会会員