

予防保全工法ガイドライン
[研磨による応力改善工法]

平成 21 年 10 月

一般社団法人 日本原子力技術協会

はじめに

我が国の原子力発電所では、安全・安定運転を確保するため、炉内構造物等の健全性を確認あるいは保証することが、重要な課題となっています。本ガイドラインは、このような重要性に鑑み、損傷発生の可能性のある構造物について、点検・評価・補修等に関する要領を提案するものです。

平成12年、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会が、(社)火力原子力発電技術協会に設置され、これまでに各種のガイドラインを発行してまいりました。平成19年より本検討会は、日本原子力技術協会に継承され、検討を継続しております。

本ガイドラインの策定にあたっては、常に最新知見を取り入れ、見直しを行っていくことを基本方針としております。この方針に則り、現行版の発行後も最新知見の調査および収集に努めることと致します。本ガイドラインが原子力産業界で活用され、原子力発電所の安全・安定運転の一助になることを期待しております。

最後に、本ガイドラインの制定にあたり、絶大なご助言を賜りました学識経験者、電力会社、メーカーの方々等、関係各位に深く感謝いたします。

平成21年10月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
委員長 野本敏治

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(平成21年10月現在,順不同,敬称略)

委員長	野本 敏治	東京大学名誉教授
副委員長	関村 直人	東京大学教授
委員	安藤 柱	横浜国立大学名誉教授
委員	安藤 博	元(財)発電設備技術検査協会
委員	辻川 茂男	東京大学名誉教授
委員	西本 和俊	大阪大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	班目 春樹	東京大学教授
幹事	坂下 彰浩	東京電力(株)
幹事	吉田 裕彦	関西電力(株)
幹事	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	舟根 俊一	北海道電力(株)
委員	水嶋 栄一	東北電力(株)
委員	松本 純	東京電力(株)
委員	高橋 嘉明	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	市川 義浩	中部電力(株)
委員	手操 久吾	北陸電力(株)
委員	野村 友典	関西電力(株)
委員	溝部 日出夫	中国電力(株)
委員	高木 敏光	四国電力(株)
委員	水繰 浩一	九州電力(株)
委員	坂井 毅志	日本原子力発電(株)
委員	太田 隆	日本原子力発電(株)
委員	鞍本 貞之	電源開発(株)
委員	伊東 敬	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	元良 裕一	(株)東芝
委員	小山 幸司	三菱重工業(株)
委員	杉江 保彰	日本原子力技術協会
参加者	工藤 保	原子力安全・保安院
参加者	菊池 正明	(独)原子力安全基盤機構
参加者	山本 豊	(独)原子力安全基盤機構
事務局	関 弘明	日本原子力技術協会

ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、一般社団法人 日本原子力技術協会 に設置された炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会において、常に最新知見が反映されるよう見直しを行うという基本方針のもとに、本ガイドラインに関する専門知識と関心を持つ委員により中立、公平、公正を原則とした運営規約に従う審議を経て、制定されたものである。また、ガイドライン検討会は、ガイドラインが許認可にも適用可能となるよう別途、透明性、公開性、公平性のある手続きに従って学協会規格に取り入れられるよう働きかける。なお、ここで「最新知見」とは、その時点で工学的に公知化されていて、ガイドライン及びその「解説」「参考資料」に示し得る範囲の知見であり、「工学的に公知化されている」とは、その分野の専門知識を有する者により認められた工学的な客観事実のことである。

本ガイドラインは各規程事項の技術的根拠を明確にしており、その示した根拠の範囲内においてガイドライン検討会はガイドラインの記載内容に対する説明責任を持つが、これ以外の本ガイドラインを使用することによって生じる問題などに対して一切の責任を持たない。また、このガイドラインに従って行われた点検、評価、補修等の行為を承認・保証するものではない。従って、本ガイドラインの使用者は、本ガイドラインに関連した活動の結果発生する問題や第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任が使用者にあることを認識して、このガイドラインを使用する責任を持つ。

なお、本ガイドラインの発行をもって、この規格が我が国の規制当局によって承認されたと考えてはならない。

予防保全工法ガイドライン
[研磨による応力改善工法]

目 次

第1章 目的及び適用	
1.1 目的	1
1.2 適用	1
第2章 工法の概要	1
第3章 工法適用の条件	1
第4章 工法適用に対する要求事項	
4.1 工法に対する要求事項	2
4.2 使用装置に対する要求事項	2
4.3 作業員，オペレータに対する要求事項	2
4.4 工法適用にあたっての注意事項	2
第5章 施工後の確認	2

解説

[解説-1] ガイドライン制定の目的	3
[解説-2] 研磨の加工メカニズム	3
[解説-3] 研磨による応力改善効果	5
[解説-4] 研磨による副次効果	7
[解説-5] 基本支配因子	8
[解説-6] 期待する残留応力改善効果	8
[解説-7] 施工管理項目	8

付録

付録A 研磨砥石の種類例	
--------------	--

第1章 目的及び適用

1.1 目的

本ガイドラインは、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器及び加圧水型原子力発電所（PWR）用機器の応力腐食割れ（SCC）に対する予防保全を目的に、機器の各部材における表面の応力改善を図るために適用される研磨工法の適用要領についてまとめたものである。[解説-1]

1.2 適用

1.2.1 適用範囲

本ガイドラインは、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金を使用している BWR 用機器及び PWR 用機器に適用する。

1.2.2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、製造・建設時を含む発電所の商業運転開始前及び商業運転開始後の供用期間中とする。

第2章 工法の概要

研磨による応力改善工法は、研磨施工表面に塑性変形を付与することにより、圧縮残留応力を生成する技術である。研磨は、回転駆動ヘッドに取り付けた研磨砥石を材料表面に軽く押し付けることにより施工する。回転駆動ヘッドの位置操作は作業員が実施する場合と装置による場合がある。[解説-2]

一般に、引張応力は SCC が発生するための必要条件であり、表面の引張残留応力を圧縮残留応力に改善できる研磨工法は、有効な SCC 予防保全対策と位置付けられる。[解説-3]

[解説-4]

研磨工法による圧縮残留応力の生成に影響を与える基本支配因子は、以下と考えられるため、工法適用の条件及び工法適用に対する要求事項に反映する必要がある。[解説-5]

- ・ 研磨砥石の種類
- ・ 研磨砥石の周速度
- ・ 研磨砥石の押付け力
- ・ 単位面積当たりの施工時間
- ・ 施工環境（気中 / 水中）

第3章 工法適用の条件

本予防保全工法の適用条件として、以下の項目について事前に実施・確立しておくこと。

（事前の実施・確立事項）

- （1）工法を適用する範囲の設定
- （2）期待する応力改善等の効果の設定 [解説-6]
- （3）施工要領確認試験の実施
- （4）適用箇所の施工後確認方法

なお、工法適用にあたり、上記(2)の期待する改善効果に影響を及ぼす基本支配因子に対する要求値が変更される場合は、その都度、施工要領確認試験を実施し、施工要領を再設定すること。

第4章 工法適用に対する要求事項

4.1 工法に対する要求事項

工法を適用するにあたり、以下の要求事項を確認すること。

- (1) 適用箇所の施工対象面に割れ等の有害な欠陥がないことの確認
- (2) 適用対象部位の材料、形状、寸法、表面状態の確認
- (3) 工法における基本支配因子の確認
- (4) 基本支配因子における管理項目とその要求値の確認 [解説-7]

4.2 使用装置に対する要求事項

第3章(3)の施工要領確認試験を実施する際に、装置(回転駆動ヘッド及び回転駆動ヘッドの位置操作装置)の仕様(要求事項)を明確にし、その仕様を満足する装置を使用すること。

4.3 作業員、オペレータに対する要求事項

回転駆動ヘッドを作業員が操作する場合の作業員及び、回転駆動ヘッドの位置操作装置を使用する場合のオペレータは、技量の確認を含め、実機施工の一連の施工手順をモックアップなどにより訓練を受ける必要がある。作業員、オペレータの技量の確認事項及び関連作業との確認事項を明確にし、これらの事項を達成するための訓練を受けること。

4.4 工法適用にあたっての注意事項

- (1) 本工法の施工により影響を受ける可能性がある施工対象部位については、施工前に影響を適切に評価すること。
- (2) 供用中の炉内機器を対象として施工する場合は、研磨砥石の砥粒等は、施工部またはその周辺に残存しても、施工部又は周辺機器に悪影響を及ぼさないことを事前に確認のこと。

第5章 施工後の確認

本予防保全工法の施工後、前記4.1項(4)の基本支配因子における管理項目の要求値を満足していることを確認すること。

また、目視試験(VT-1)等により、施工面に異常がないことを確認すること。

[解説-1] ガイドライン制定の目的

国内プラントにおいて、経年変化事象による損傷が散見されてきたことから、炉内構造物に要求される安全上重要な機能が維持されていることを確認するための点検手法として、炉内構造物の点検評価ガイドラインの検討を進めており、損傷を未然に防止するための予防保全についても、施工管理に関するガイドラインが必要となっている。

本ガイドラインは、原子力発電用設備の安全上要求される機能を維持するために、応力腐食割れに対する予防保全工法としての研磨技術の適用要領をまとめたものである。

[解説-2] 研磨の加工メカニズム

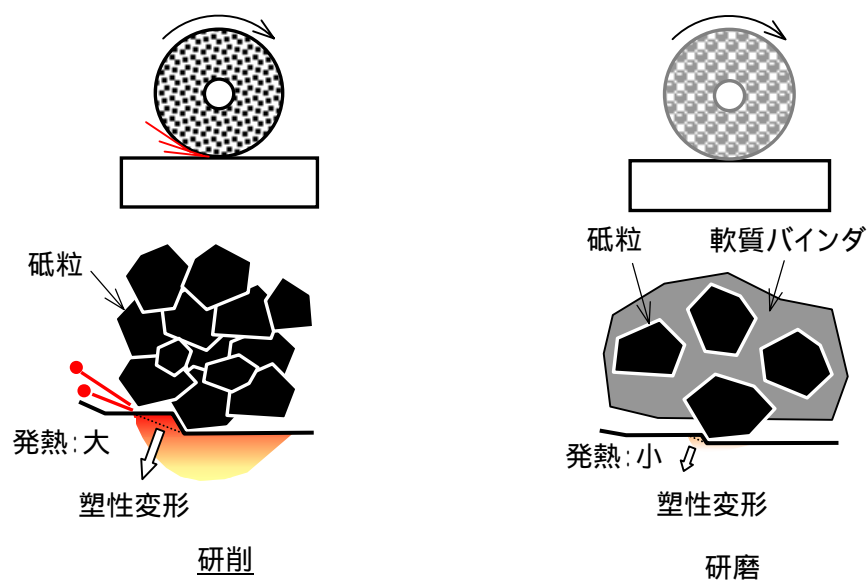
研磨に用いる砥石の構造と加工メカニズムの概念を、研削と比較して解説図2-1に示す。

研削に用いる砥石は砥粒が緻密に硬くバインドされているのに対して、研磨に用いる砥石は砥粒が軟らかいバインダで結合されているのが特徴である。研磨砥石のバインダとしては、紙、布、スポンジ形状材、ブラシ形状材などが用いられている。(付録A)

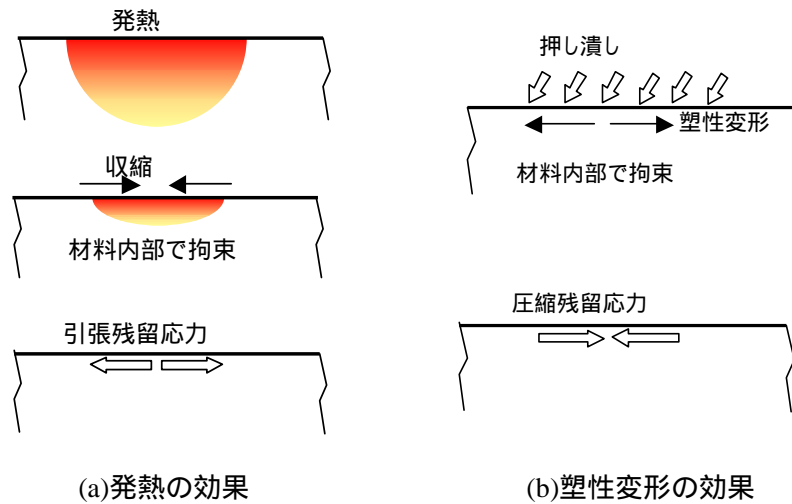
表面加工の機構は、研削、研磨とも、砥粒が材料表面を叩き、押し潰す過程と、砥石の回転に伴って砥粒が材料表面を擦り取る過程の組み合わせと考えられる。これらの過程により、材料表面に塑性変形が生じるとともに発熱が生じるが、研削の場合は、砥石が硬く砥粒の押付け力が保持されたまま材料表面を擦り取るため、研磨に比べ発熱量が大きいと考えられる。

表面残留応力に及ぼす発熱と塑性変形の効果の概念を解説図2-2に示す。発熱した場合、表面は冷却過程で収縮しようとするが、内部の材料に拘束されるため、材料表面に引張残留応力が発生する。一方、材料表面が塑性変形すると延ばされようとするが、内部の材料に拘束されるため、材料表面には圧縮の残留応力が発生する。

一般に研削表面では引張残留応力が生じるのに対して、研磨による表面加工では、材料表面を叩き、押し潰す過程による塑性変形が、発熱による影響よりも大きいため、表面の残留応力が圧縮応力に変化するものと考えられる。

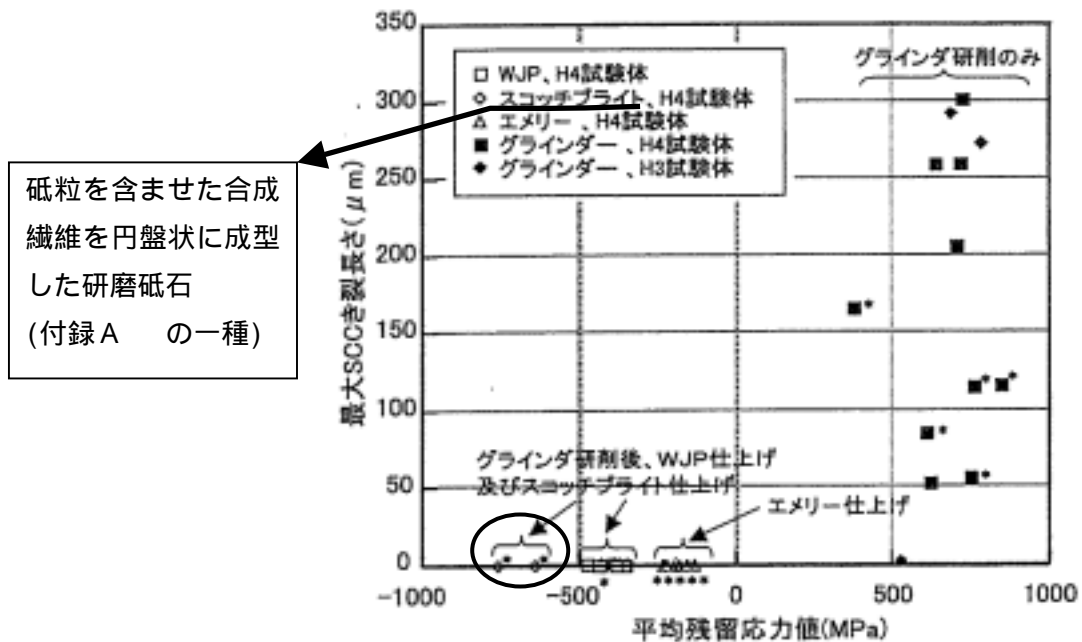


解説図 2-1 研削と研磨の加工メカニズムの概念比較



解説図 2-2 発熱の効果と塑性変形の効果

解説図 2-3 に研削、研磨及びその他の表面加工を施した試験材(シュラウド H3, H4 溶接模擬)の表面残留応力及び CBB 試験結果の例を示す。グラインダ研削施工面(図中 ■ 及び ◆)は、表面の引張残留応力が 500MPa を超え、CBB 試験では深い SCC き裂が生じているが、グラインダ研削施工面に研磨施工(スコッチブライト)を行った面(図中 ◇)では、表面残留応力が引張から圧縮に改善され、CBB 試験での SCC き裂の発生はなく、研磨施工が SCC 抑制に有効であることが示唆されている。



解説図 2-3 各種表面加工による表面残留応力と SCC 抑制効果例

(出典) 高守、他 2 名「高温水中における低炭素ステンレス鋼の SCC の発生と進展」保全学 Vol.3 No.2 (2004)

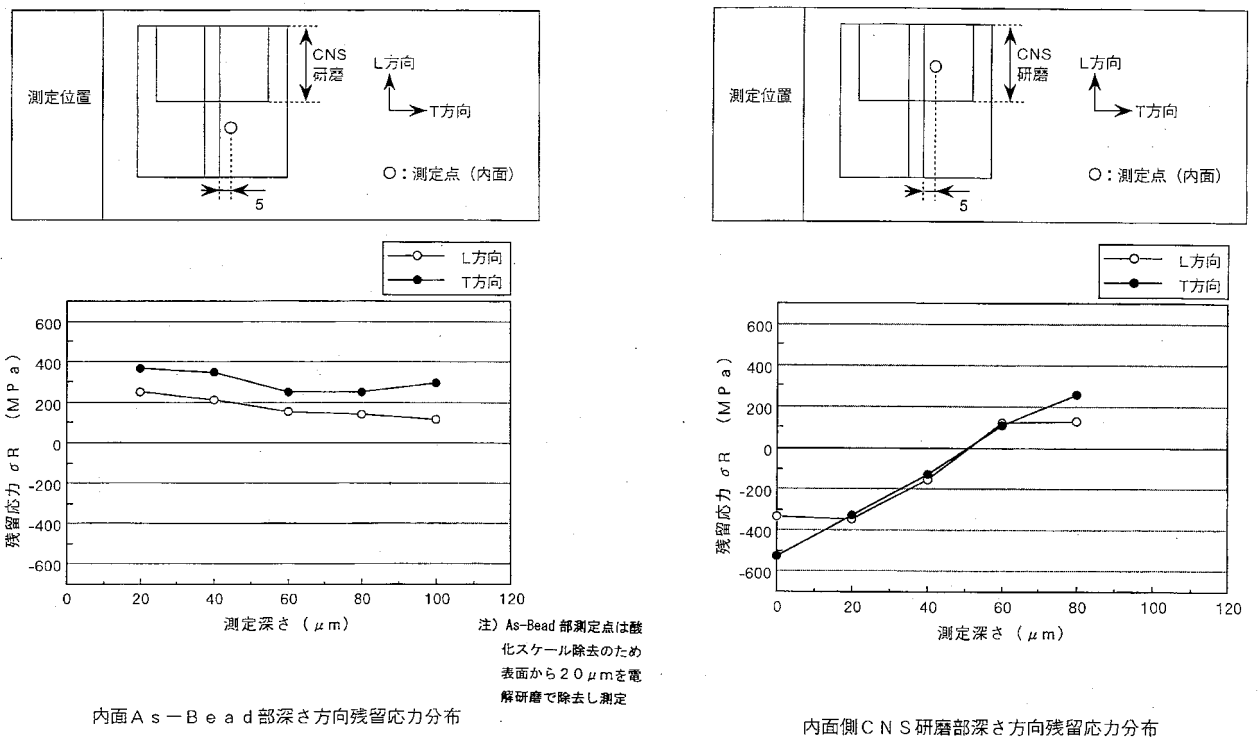
[解説-3] 研磨による応力改善効果

研磨による応力改善工法は、SCC 予防保全策として、炉心シュラウド他の炉内構造物への適用実績が数多くある。

解説図 3-1 に炉心シュラウド H4 溶接を模擬した試験材の研磨による応力改善例を示す。研磨並進方向（図中L方向）、直交方向（図中T方向）とも、溶接による引張残留応力（左側の図）が、研磨施工により、表面から 50 μm 程度の深さまで圧縮応力に改善（右側の図）されている。

ピーニング施工後の残留応力（解説図 3-2 にウォータージェットピーニングの例を示す。）と比較すると、一般に、残留応力改善効果の及ぶ板厚方向の深さが小さいものの、表面の残留応力は同等の圧縮応力が得られる。

解説図 3-3 に蒸気発生器出入口管台の試験材の研磨による応力改善例を示す。前処理として機械加工仕上げとグラインダ仕上げの両ケースで研磨を行い、表面の残留応力が施工後に研磨並進方向、直交方向ともに圧縮応力に改善されている。

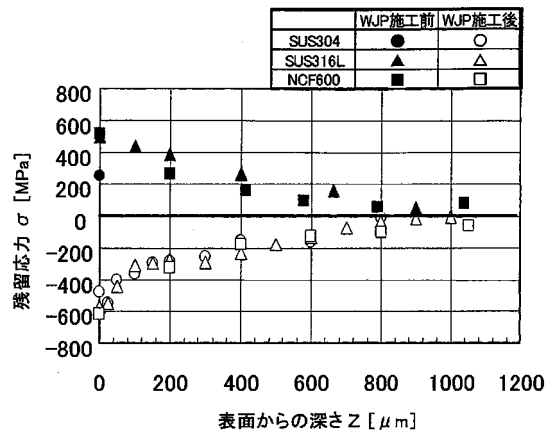


研磨非施工部

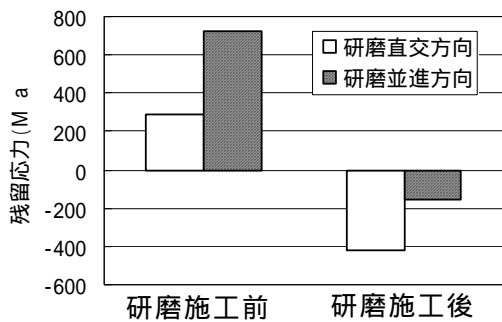
研磨施工部

解説図 3-1 研磨施工による応力改善例（炉心シュラウド H4 溶接模擬）

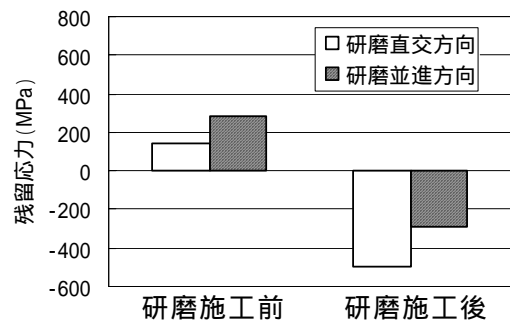
（出典）BWR 電力共通研究データ



解説図 3-2 ウォータージェットピーニング (WJP) 施工による応力改善例
 (出典) 予防保全工法ガイドライン[ピーニング工法]



(a) 機械加工仕上げ表面への研磨



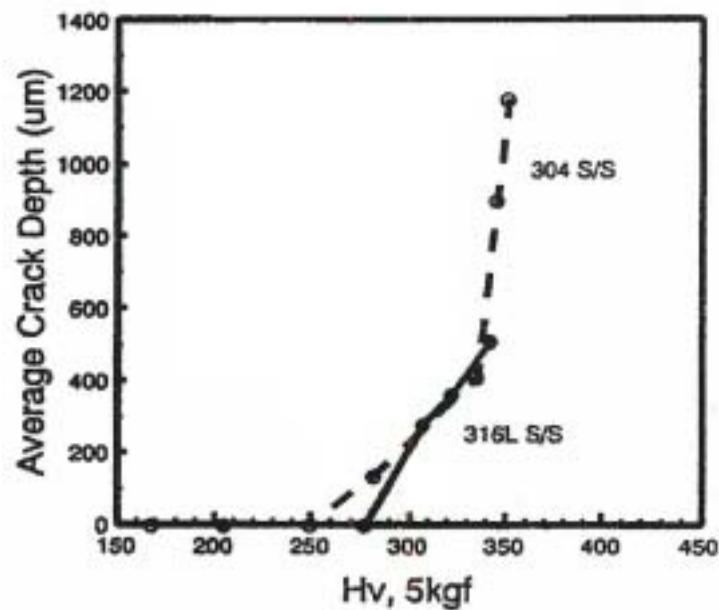
(b) グラインダ仕上げ表面への研磨

解説図 3-3 研磨施工による応力改善例 (蒸気発生器出入口管台の試験材)

[解説-4] 研磨による副次効果

研磨施工により材料の極表層部が除去されることから , オーステナイト系ステンレス鋼において , SCC の材料因子のひとつとされる , 製造過程で生じた冷間加工硬化層の影響が低減される副次効果も期待される。

研削加工や機械加工により生成される加工硬化層は , 材料表面で大きく , 内部程小さい硬さ分布が生成されている。オーステナイト系ステンレス鋼については , 硬さが閾値 (SUS316L で約 270Hv) 以上では SCC の感受性を有し , 硬さの上昇に伴い大きくなることが示唆される試験データ (解説図 4-1) が知られている。従って , 研削加工面や機械加工面に研磨施工を実施した場合に、加工硬化層の表層部が除去されることにより表面の硬さが低減され SCC 感受性が低減されるものと考えられる。



解説図 4-1 CBB 試験による硬さと SCC 発生の関係

(出典)

M.Tsubota, Y.Kanazawa, H.Inoue, " Effect of Cold Work on the SCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steels " Proceedings of 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems Water Reactors, Vol.1(1995)519-527

[解説-5] 基本支配因子

解説-2 に示す研磨施工による塑性変形効果及び発熱効果の大小は、主に研磨砥石の種類（バインダ及び砥石の材料）に支配されるものと考えられるが、研磨砥石の周速度、研磨砥石の押付け力、単位面積当たりの施工時間にも影響される。また、施工環境（気中／水中）は、発熱効果に対して影響を及ぼす。

[解説-6] 期待する残留応力改善効果

溶接試験材を用いた場合の施工要領確認試験において、研磨施工後に、溶接溶融線から少なくとも 10mm 以上の範囲に亘って、その表面での X 線による残留応力測定を行い、溶接による引張残留応力が 0MPa 以下の残留応力に転換されていることを確認する必要がある。研磨施工の並進方向の応力成分とこれと直交する方向の応力成分では、応力改善効果は一様ではないため、改善が必要な応力成分を明確にした上で、研磨施工方向を含めた有効な施工要領を確認する必要がある。

また、残留応力改善深さはピーニング工法に比べ浅いことから、供用中に想定される溶出等による減肉量を考慮して、応力改善を期待する深さを事前に定めておく必要がある。

[解説-7] 施工管理項目

研磨工法の基本支配因子から抽出した施工管理項目を、解説表 7-1 に を付して示す。

このうち、応力改善効果に最も影響を及ぼす研磨砥石については、以下に示す管理が必要である。

- (1) 個々の品質に有意なバラつきがないことが実績等により予め確認された、砥石製造メーカーの型式、型番等の砥石を選定する。
- (2) 所定の応力改善効果が得られる継続施工時間を予め試験で確認し、これを基に実機施工における砥石交換時期を定め、管理する。

なお、解説表 7-1 の施工管理項目は、使用する装置等に応じて適切な項目（例えば、圧縮空気駆動の回転駆動ヘッドの回転数を間接的に空気圧で管理する場合）に置き換えてもよい。

回転駆動ヘッドの位置操作に自動装置を用いる場合には、実機施工において施工管理項目が要求値を満足していることを確認する。

回転駆動ヘッドの位置操作を作業員が手動で行う場合には、回転駆動ヘッドの並進速度等（表中 を付した項目）は、実機施工において具体的な値を確認することが困難なため、施工管理項目とはしない。これらの項目については施工目標を定めた上で作業モックアップを実施して、作業員の技量を習熟させる必要がある。実機施工においては、施工管理項目が要求値を満足していること及び事前の作業モックアップで十分な技量が確認された作業員が施工したことを確認する。

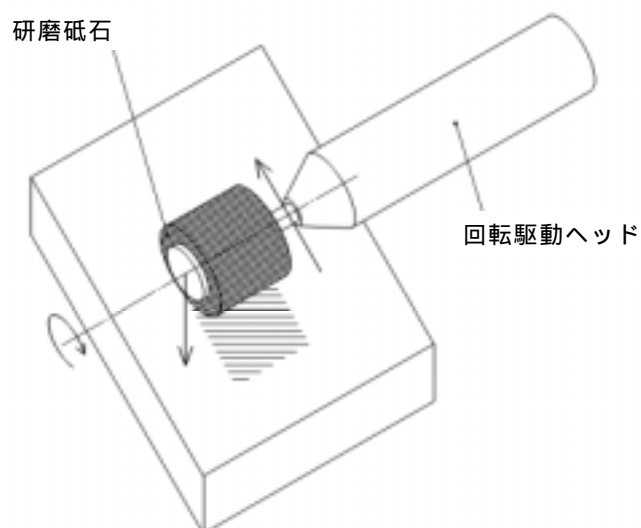
解説表 7-1 基本支配因子と管理項目

基本支配因子	施工管理項目			
	項目	適用 (注1参照)		
		自動装置により 施工する場合	手動により施工 する場合	
研磨砥石の種類	研磨砥石の種類			
研磨砥石の周速度	研磨砥石の径			
	研磨砥石の回転速度 / 方向	下図		
	研磨砥石の並進速度	下図		
研磨砥石の押付け力	研磨砥石の押付け力	下図		
単位面積当たりの施工時間	施工回数			
	オーバーラップ幅			
施工環境	施工環境 (水中/気中)			

注 1

○ : 施工管理項目とする。

□ : 施工管理項目としない。



付録A 研磨砥石の種類例

紙やすりを放射状に束ねた研磨砥石（フラップホイール）



砥粒を付着させた布を円盤状に束ねた研磨砥石（パフ）



砥粒を含ませた合成繊維を円盤状に成型した研磨砥石



砥粒を含ませたブラシ状の物質を円盤状に束ねた研磨砥石



予防保全工法ガイドライン
[研磨による応力改善工法]

編集者 一般社団法人 日本原子力技術協会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
発行者 一般社団法人 日本原子力技術協会
〒108-0014 東京都港区芝4-2-3 NOF芝ビル7階
電 話 03(5440)3603(代)
F A X 03(5440)3606

© 日本原子力技術協会，2009

本書に掲載されたすべての記事内容は、日本原子力技術協会の許可なく、
転載・複写することはできません。