

予防保全工法ガイドライン
[ピーニング工法]

平成20年1月

有限責任中間法人 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、有限責任中間法人 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20年1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

予防保全工法ガイドライン [ピーニング工法]

改訂履歴

ガイドライン名： 改訂年月	版	改訂内容	備考
平成 18 年 3 月	初版発行		
平成 20 年 1 月	第 2 版	超音波ショットピーニング工法を追加。 ウォータージェットピーニング工法及び レーザーピーニング工法の記載見直し。	

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19年12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	小林 敏行	北海道電力(株)
委員	丹治 和宏	東北電力(株)
委員	松本 純	東京電力(株)
委員	石沢 順一	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	肥田 茂	中部電力(株)
委員	米田 貢	北陸電力(株)
委員	野村 友典	関西電力(株)
委員	平野 伸朗	関西電力(株)
委員	小川 誓	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	青木 孝行	日本原子力発電(株)
委員	師尾 直登	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	谷本 政隆	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、有限責任中間法人 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

[ピーニング工法]

目次

第1章	目的及び適用	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	2
	4.1 工法適用にあたっての前提条件	2
	4.2 工法に対する要求事項	2
	4.3 使用装置に対する要求事項	2
	4.4 オペレータに対する要求事項	2
	4.5 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) 期待する応力改善効果の設定	3
	(解説-2) 施工板厚の確認	4

[添付]

- 添付1 PWR ウォータジェットピーニング工法
- 添付2 BWR ウォータジェットピーニング工法
- 添付3 レーザピーニング工法
- 添付4 超音波ショットピーニング工法

第1章 目的及び適用

本ガイドラインは、沸騰水型原子力発電所（BWR）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ピーニングの適用要領についてまとめたものである。

なお、具体的な適用対象および工法の詳細は、添付1～添付4によるものとする。

第2章 工法の概要

オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）の SCC が発生する一要因として、構造体の接液部表面における引張残留応力が挙げられる。

ピーニングは、構造体の表面に投射された媒体により生じる衝撃圧力により、表面に塑性変形（押し延ばし）を発生させ、周囲から弾性的に拘束されることで、圧縮残留応力を生成させる技術であり、構造体の表面を圧縮残留応力とすることで、SCC の発生の抑制効果が期待できる。

圧縮残留応力の生成に影響を与える施工因子（基本支配因子）としては、以下のものが考えられるが、各施工因子の影響は工法毎に定め、工法適用の条件および工法適用に対する要求事項に反映する必要がある。

- －媒体を投射する出力（エネルギー）及び範囲（時間 or 回数）
- －媒体により定まる投射条件
- －対象材料の周辺環境

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) 本工法を適用する範囲の設定
- (2) 期待する応力改善効果の設定（解説-1）
- (3) 施工要領確認試験の実施
- (4) 適用箇所の施工確認方法の確立

尚、工法適用にあたり、第4章に示す工法に対して期待する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 工法適用にあたっての前提条件

本予防保全工法を適用するにあたり、適用対象および工法毎に定めた前提条件に従うこと。

4.2 工法に対する要求事項

本予防保全工法を適用する場合は、適用対象および工法毎に定めた以下の要求事項を確認すること。

- (1) 適用対象部位の材料、形状、寸法の確認（解説-2）
- (2) 工法毎の基本支配因子の確認
- (3) 基本支配因子における管理項目の要求値の確認

4.3 使用装置に対する要求事項

第3章(3)にて実施する施工要領確認試験を実施する際に、装置仕様（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。

なお、施工要領確認試験で明確にした装置仕様以外の装置を使用する必要がある場合は、その差異を明確にし、適切な技術的評価を実施すること。

4.4 オペレータに対する要求事項

本予防保全工法に関するオペレータの技量としては、装置の施工対象部位への設定、投射ノズル又は投射ヘッドの走行・位置の設定及び操作盤の操作・運転などが考えられる。したがって、オペレータは技量の確認及び関連作業との確認も含め、実機施工の一連の施工手順をモックアップなどで訓練を受ける必要がある。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実施すること。

4.5 工法適用にあたっての注意事項

過度のピーニングによる材料への悪影響が懸念される場合には、施工要領確認試験結果に基づき施工の重ね合わせや長時間施工等に対する投射時間の制限を設けること。

また、ピーニング対象箇所周辺の機器に対し、悪影響が懸念される場合には、施工前に影響を適切に評価するか、もしくは、施工後に健全性について確認すること。

第5章 施工後の確認

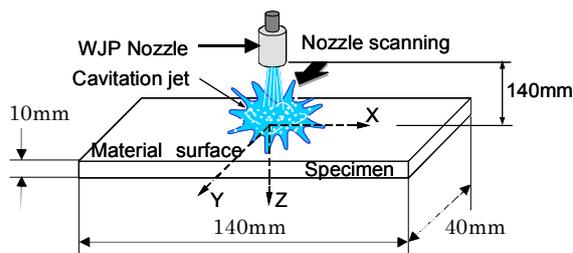
本予防保全工法の適用後、上記4.2項の工法に対する要求事項を満足することを確認すること（施工中の確認含む）。また、施工範囲において、施工面に異常がないことを確認すること。

(解説-1) 期待する応力改善効果の設定

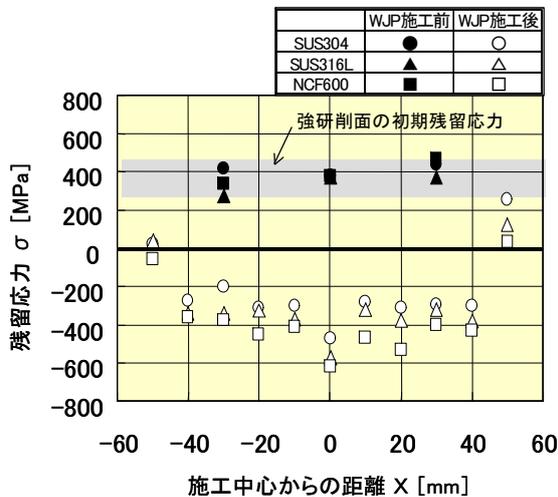
溶接試験材を用いた場合の施工要領確認試験において、ピーニング施工後に、溶接溶融線から少なくとも 10mm 以上の範囲に亘って、その表面及び表面下での X 線による残留応力測定を行い、溶接による引張残留応力が少なくとも 0 MPa 以下の圧縮残留応力に転換されていることを確認する必要がある。

目標とする残留応力改善深さは、耐 SCC 性の観点から、微小き裂の存在を仮定しても、その微小き裂からの SCC 進展が抑制されるという考え方を基にして、それぞれの工法に応じて設定する必要がある。なお、供用期間中に想定される減肉量に相当する深さを、残留応力改善深さに予め考慮して対処する必要がある。

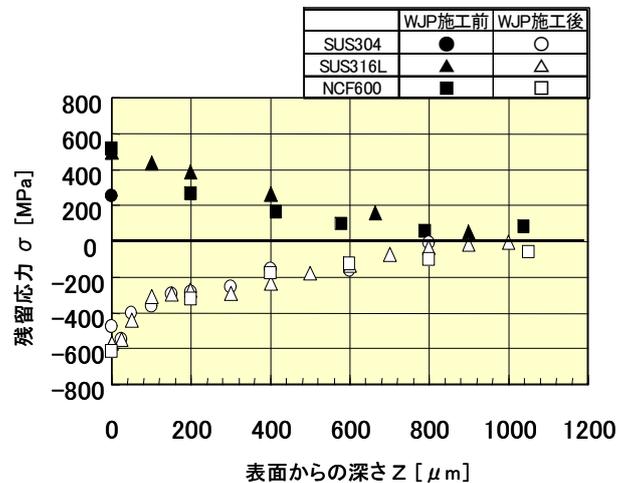
ピーニングは表面に塑性変形を与えるものなので、一般的に施工前の引張残留応力がピーニング効果に与える影響は少ないと考えられる。ピーニングの施工条件は、表面を強加工した試験材又は溶接試験材などで残留応力改善効果を確認した試験条件を基に定めている。そのため、施工前の引張残留応力が母材降伏応力程度であっても、ピーニング施工によって 0 MPa 以下の圧縮残留応力に転換できる。一例として、解説図 1-1(a)に示すように、施工前に強研削により付与した 300～450MPa の引張残留応力が、ピーニング施工後にピーニングを施工した領域では、圧縮残留応力に改善されていることを確認している。一方、ピーニング施工を超える領域（施工境界領域）でも、施工前の初期残留応力に漸近するだけで、初期残留応力を超える引張残留応力を生成することはない。したがって、初期残留応力の範囲をカバーするピーニングを施工することにより、必要な範囲の応力改善が可能である。



- ・ 噴射圧力：約 70MPa
- ・ ノズル口径：2mm ホーンノズル
- ・ 噴射角度：90°



(a) 試験片の表面残留応力分布



(b) 試験片の板厚内残留応力分布

解説図 1-1 ウォータージェットピーニングによる残留応力低減効果例

(出典：日本ウォータージェット学会「噴流工学」Vol.20、No.1 (2003年2月))

(解説-2) 施工板厚の確認

ピーニングによって材料の表面に圧縮残留応力を得るためには周りの拘束が必要であることから、適用できる施工板厚に制限を設ける。最小の施工板厚は、確性試験またはこれに準じた確認試験（あるいは施工要領確認試験）で確認した最小板厚とする必要がある。

なお、確性試験で確認した最小板厚は 5mm であったが、施工要領確認試験に合格すれば厚さ 5 mm 未満の薄板に対しても適用が可能である。

一方、厚板の場合、板厚効果により、さらに高い拘束条件が付与されるため、残留応力改善に有利に作用するものと考えられ、板厚に上限は設けない。

PWR 予防保全工法ガイドライン

[ウォータージェットピーニング工法]

1. 目的及び適用

本ガイドラインは、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ウォータジェットピーニングの適用要領についてまとめたものである。（解説 1-1）

適用対象としては、高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）の原子炉容器炉内計装筒内面、原子炉容器炉内計装筒外面、ならびに高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）の原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部、原子炉容器出入口管台、原子炉容器安全注入管台の突合せ溶接部、およびオーステナイト系ステンレスの溶接を使用している原子炉安全注入配管とする。また、適用時期としては、製造・建設時を含む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。（解説 1-2）

2. 工法の概要

本予防保全工法は、SCC によるき裂の発生を未然に防止するために、高圧水を水中でノズルから噴射することにより発生させたキャビテーション気泡が崩壊する際の衝撃圧を利用して、材料表面に塑性変形を起こさせ、構造体の表面を圧縮残留応力とすることで、SCC の発生の抑制効果が期待できる工法である。（解説 2-1）

3. 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) 期待する効果の設定及びその効果が得られるような施工要領確認試験の実施
（解説 3-1）
- (2) 適用箇所の表面近傍状態の確認方法の確立（解説 3-2）
- (3) 適用範囲の設定（解説 3-3）
- (4) 施工後の効果確認方法の確立（解説 3-4）

尚、工法適用に当たり、4. 項に示す工法に対して期待する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。（解説 3-5）（解説 3-6）

4. 工法適用に対する要求事項

4.1 工法適用にあたっての前提条件

本予防保全工法を適用するに当たり、前提条件は以下とする。（解説 4-1）

- (1) 対象は、原子炉容器炉内計装筒内面、原子炉容器炉内計装筒外面、原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部、原子炉容器出入口管台、原子炉容器安全注入管台および原子炉容器安全注入配管とする。
- (2) 環境は、原子炉キャビティ水位が規定水位に達していること。

4.2 工法に対する要求事項

本予防保全工法を適用するに当たり、以下の要求事項を確認すること。

- (1) 適用箇所の表面近傍に割れ等の有害な欠陥がないことの確認（解説 4-2）
- (2) 適用対象部位の材料、形状、寸法の確認（解説 4-3）
- (3) 工法における基本支配因子の確認（解説 4-4）
- (4) 基本支配因子における管理項目の要求値の確認（解説 4-5）

4.3 使用装置に対する要求事項

3. (1) にて実施する施工要領確認試験を実施する際に、装置仕様（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。

なお、施工要領確認試験で明確にした装置仕様以外の装置を使用する必要が生じた場合は、その差異を明確にし、適切な技術的評価を実施すること。（解説 4-6）

4.4 オペレータに対する要求事項

本予防保全工法に関するオペレータの技量としては、装置の施工対象部位への設定、投射ノズルの走行・位置の設定及び操作盤の操作・運転などが考えられる。したがって、オペレータは技量の確認及び関連作業との確認も含め、実機施工の一連の施工手順をモックアップなどで訓練を受ける必要がある。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実施すること。

4.5 工法適用にあたっての注意事項

過度のピーニングによる材料への悪影響が懸念される場合には、施工要領確認試験結果に基づき施工の重ね合わせや長時間施工等に対する投射時間の制限を設けること。

また、ウォータージェットピーニングにより影響を受ける可能性がある施工対象部位およびその施工対象部に接合された部材は、施工前に影響を適切に評価するか、もしくは施工後に健全性について確認すること。（解説 4-7）

5. 施工後の確認

本予防保全工法の施工後、上記 4.2(4) の事項が規定した管理値の範囲で施工されたことを確認すること。また、施工表面に異常がないことを目視試験（VT-3）により確認すること。（解説 5-1）

期待する効果が得られていることについては、管理項目が規定した管理値の範囲で施工されたことを確認することをもって確認にすること。（解説 3-4）

(解説 1-1)

炉内構造物では、近年海外で損傷事例が散見されてきたことから、機器に適した合理的な点検要領が検討されている。一方で、さらに、点検の合理化を図るために、点検により損傷を検知する前に、予防保全対策を適用することについても検討されてきている。

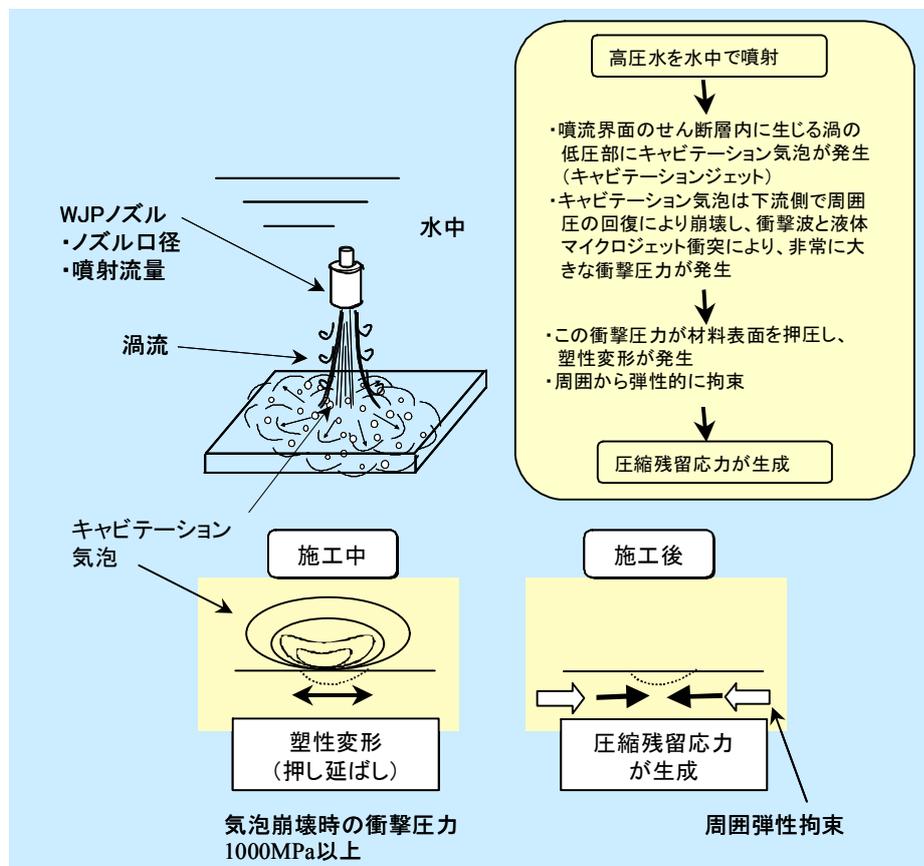
本ガイドラインは、炉内構造物の安全上要求される機能を維持するために、応力腐食割れに対する予防保全工法として、原子炉容器炉内計装筒内面、原子炉容器炉内計装筒外面、原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部、原子炉容器出入口管台、原子炉容器安全注入管台および原子炉容器安全注入配管に対するウォータジェットピーニングに対する適用要領についてまとめたものである。

(解説 1-2)

本ガイドラインにおけるウォータジェットピーニングは、製造・建設時を含む商業運転開始前及び商業運転開始後の供用期間中に適用するための技術である。

(解説 2-1) W J P (Water Jet Peening) の原理

W J P は、高圧水を水中でノズルから噴射することにより発生させたキャビテーションを含むジェットで、機器表面をピーニングする技術である。この W J P の原理を、解説図 2-1 に示す。



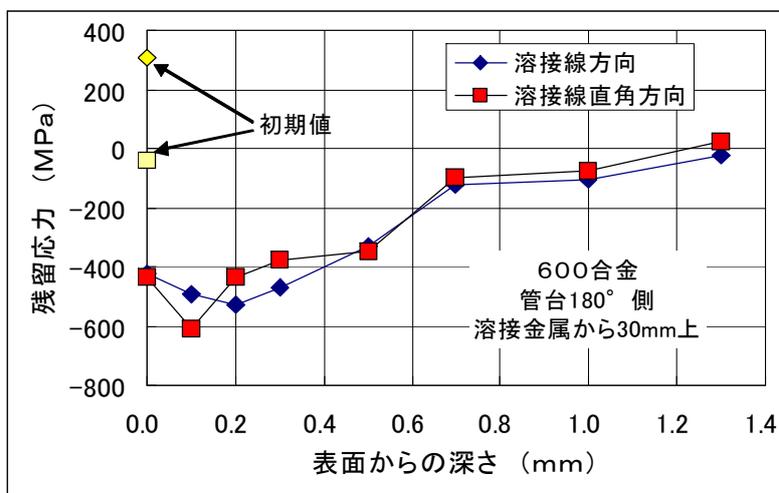
解説図 2-1 W J P の原理

(解説 3-1) 期待する効果及びその効果を得るための施工要領確認試験

ウォータージェットピーニング適用の目的は、応力腐食割れに対する予防保全工法として、表面の応力状態を圧縮応力に改善することである。

目標とする残留応力改善深さは、耐 SCC 性の観点から、微小き裂の存在を仮定しても、その微小き裂からの SCC 進展が抑制されるという考え方を基にして設定する必要がある。例えば J 溶接部に施工した下図に示すように、1,000 μm (1.0mm) 深さの範囲までを圧縮応力に転換できる場合、1,000 μm (1.0mm) 程度深さのき裂があっても、ウォータージェットピーニングによる効果は期待できる。

このような期待する効果を得るための、ウォータージェットピーニングの施工条件を設定するために、施工要領確認試験を実施する。試験は、期待する効果に影響を及ぼす施工条件である基本支配因子に対する要求値を設定した上で、期待する効果が得られるかどうかの確認を、実機条件を模擬したモックアップ供試体などを使用して実施する。



解説図 3-1 期待する効果例

出典：「加圧水原子炉発電プラントに対する高経年化保全技術」

三菱重工 谷口ら '06 火力原子力発電大会 予稿

(解説 3-2) 表面状態の確認方法

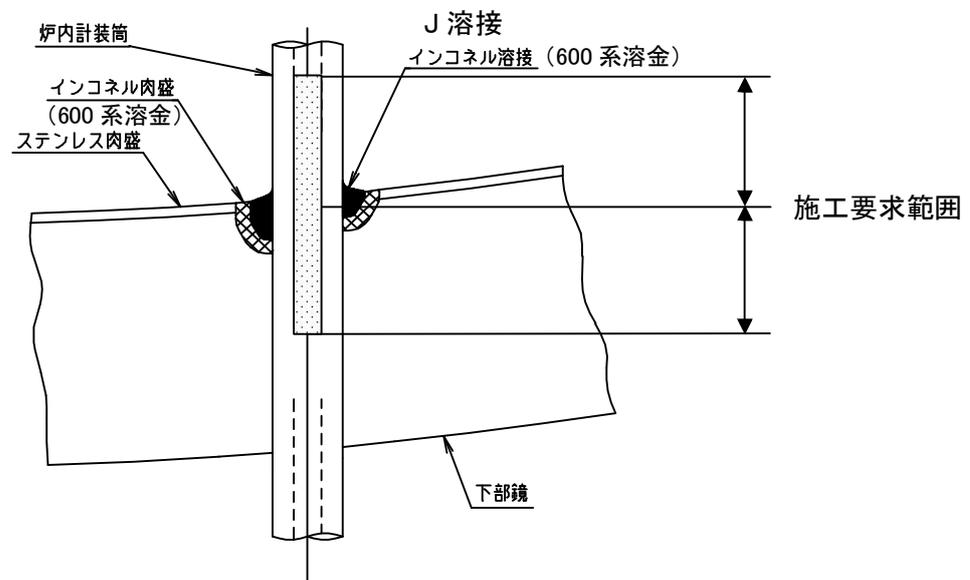
ウォータジェットピーニングを適用するに当たり、施工前の表面状態を確認するための目視検査、非破壊検査などの検査手法を選定しておく必要がある。

(解説 3-3) 適用範囲の設定

適用範囲は溶接により残留応力が発生すると考えられる、以下の各項に示す範囲とする。

a) 原子炉容器炉内計装筒内面

炉内計装筒に対するウォータジェットピーニング適用範囲としては、炉内計装筒が下部鏡に取付けられる際の J 溶接により残留応力が発生すると考えられる範囲とする。具体的には、J 溶接部近傍の炉内計装筒内面とする。

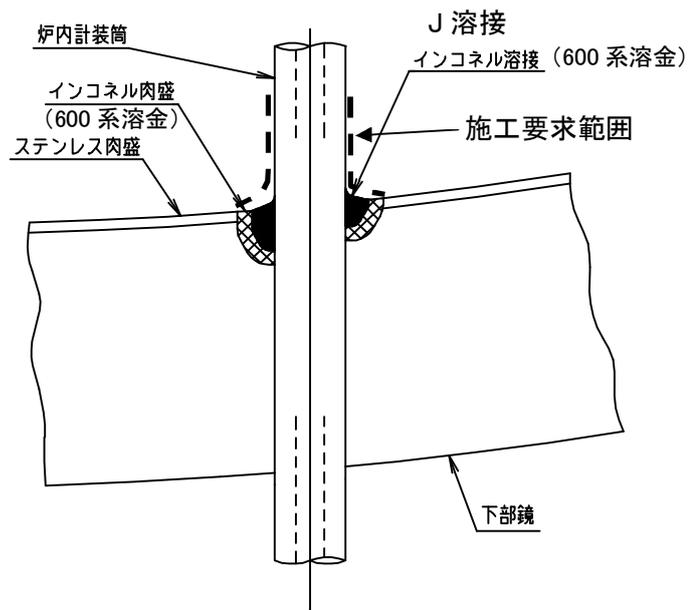


解説図 3-2 原子炉容器炉内計装筒に対するウォータジェットピーニング適用範囲

b) 原子炉容器炉内計装筒外面およびJ溶接部

原子炉容器炉内計装筒外面およびJ溶接部に対するウォータージェットピーニング適用範囲としては、炉内計装筒が下部鏡に取付けられる際のJ溶接により残留応力が発生すると考えられる範囲とする。具体的には、J溶接部近傍の炉内計装筒外面およびJ溶接部の範囲とする。

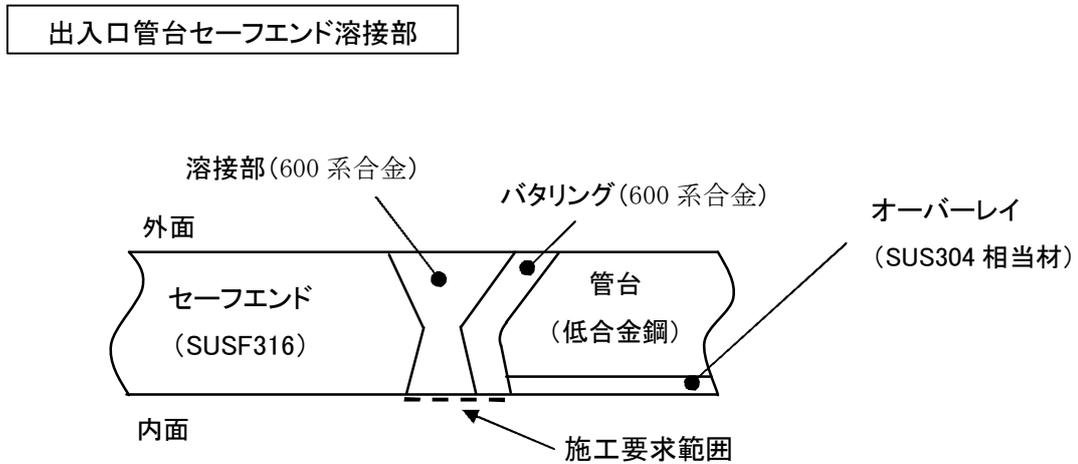
炉内計装筒外面およびJ溶接部



解説図 3-3 原子炉容器炉内計装筒外面およびJ溶接部に対するウォータージェットピーニング適用範囲

c) 原子炉容器出入口管台

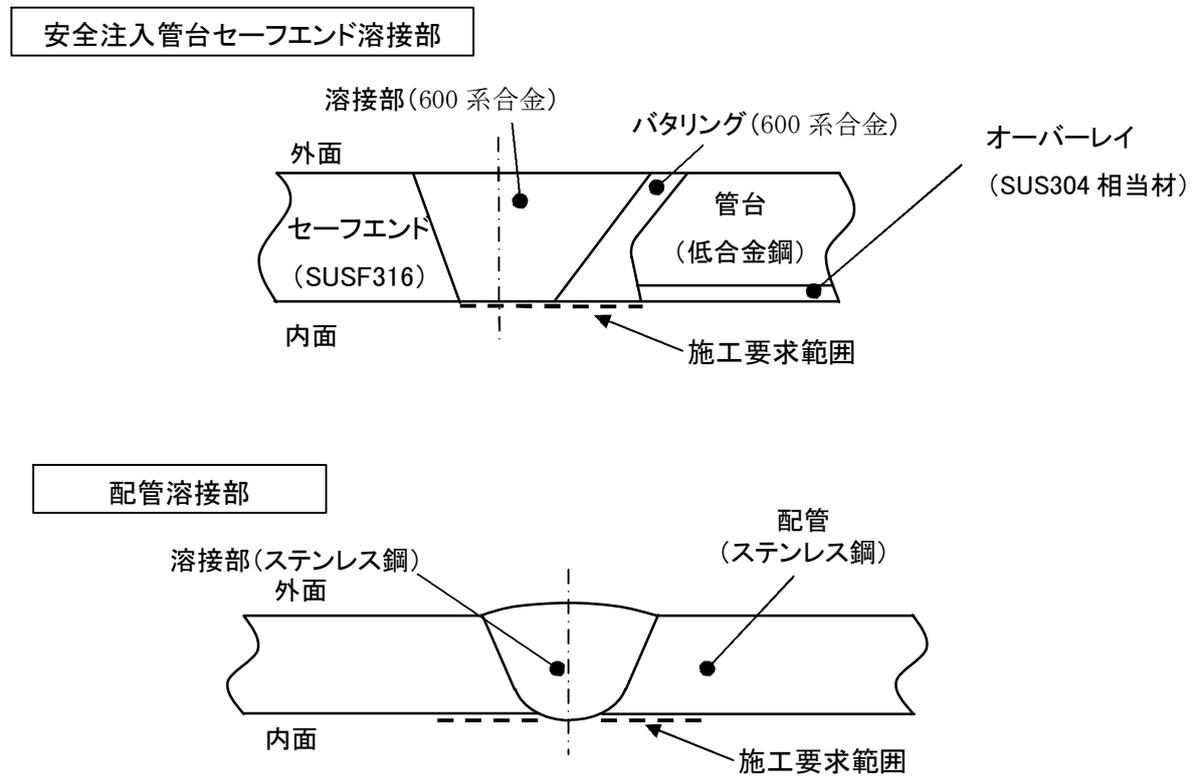
原子炉容器出入口管台に対するウォータジェットピーニング適用範囲としては、溶接により残留応力が発生すると考えられる範囲とする。具体的には、異材継手溶接部およびバタリング部とする。



解説図 3-4 原子炉容器出入口管台に対するウォータジェットピーニング適用範囲

d) 原子炉容器安全注入管台および配管

原子炉容器安全注入管台に対するウォータジェットピーニング適用範囲としては、溶接により残留応力が発生すると考えられる範囲とする。具体的には、異材継手溶接部およびバタリング部、安全注入配管溶接部とする。

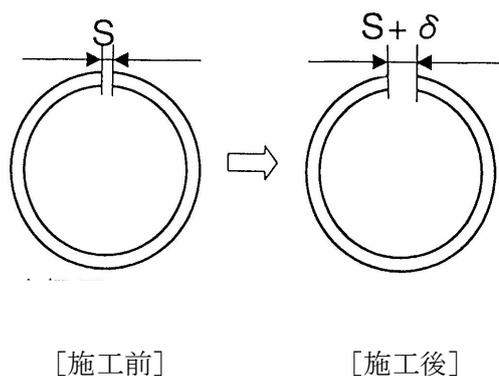


解説図 3-5 原子炉容器安全注入管台および配管に対するウォータジェットピーニング適用範囲

(解説 3-4) 効果確認方法

適用するウォータージェットピーニングが、期待する効果が得られる工法であったことを、適用後に直接的に確認することが不可能である。そのため、施工管理項目が、施工要領確認試験の際に設定された施工条件と著しく異なっていないことを継続的に管理することによって、効果の有無を確認する。また、間接的に効果を確認する方法として平板試験片あるいはスリット付薄肉円管状試験片（噴射口が円筒状のノズルに設けられている場合）などで施工前後に試験を実施し、工法の妥当性を示す工法がある。

スリット付薄肉円管状試験片を用いる例として、円管内面にウォータージェットピーニングを施工し、試験片の変形量と施工条件の関係から、設定した施工条件の妥当性を示すことが可能となる。



変形量 δ と施工条件の関係を評価しておき、所定の変形量が得られることを確認した上で、実機施工とする。また、施工後においても施工前の条件で得られた変形量であることを確認し、施工条件の妥当性を示す。

解説図 3-6 スリット付薄肉円管状試験片

(解説 3-5) 基本支配因子

本ガイドラインにおける基本支配因子の定義は以下とする。具体的内容は（解説 4-4）参照。

- ・ 基本支配因子とは、工法の活用原理に基づき工法の有効性を支配する支配方程式中の変数または独立変数であり、工法の有効性を確保する上でコントロールすることが必要不可欠で、かつモックアップ試験等によりその有効範囲が確認された施工因子のことを言う。

(解説 3-6) 施工要領確認試験の再試験

施工要領確認試験の実施により設定された施工条件のうち、基本支配因子に対する要求事項を変更する場合は、工法適用により期待する効果を再設定し、その効果を得るための施工条件を、施工要領確認試験を実施することにより再設定する必要がある。

(解説 4-1) ウォータージェットピーニング適用に当たっての前提条件

ウォータージェットピーニングを適用するに当たっての前提条件として、対象は原子炉容器炉内計装筒内面、原子炉容器炉内計装筒外面、原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部、原子炉容器出入口管台、原子炉容器安全注入管台および原子炉容器安全注入配管とする。また、適用環境としては、定期検査中の原子炉キャビティを規定水位まで水を張った状態とする。

(解説 4-2) 施工前確認

ウォータージェットピーニングを適用するに当たり、表面近傍に割れ等の有害な欠陥がないことを

適用前に確認する必要がある。確認方法としては、目視検査（MVT-1）、非破壊検査（ECT など）とする。

(解説 4-3) 適用対象部位の材料、形状、寸法

適用対象部位である炉内計装筒については、プラントにより形状寸法・材料が異なっていたり、また、ループ数により原子炉容器下部鏡寸法も異なっていることから、ウォータジェットピーニング装置のインタフェイスの観点で、適用プラント毎に炉内計装筒廻り、原子炉容器出入口管台廻りおよび原子炉容器安全注入管台廻りの形状寸法を確認しておく必要がある。

(解説 4-4) ウォータジェットピーニングにおける基本支配因子

WJPは、キャビテーションの崩壊時に発生する高い衝撃圧力で機器表面を押圧することにより引張残留応力を低減させるか、または圧縮残留応力へと転換させる工法である。

WJPの施工条件に関する前提条件と基本支配因子を解説表4-1に示す。各基本支配因子の中で、WJPの施工対象を加圧水型原子力発電所（PWR）用機器とした場合について検討を実施し、その中でピーニング効果を決定する基本支配因子のみを確認項目とした。

WJPは、キャビテーションジェットが部材に当たった後の反射噴流や回り込み噴流、隙間部への吹込み噴流等も残留応力改善に利用できることから、狭隘部や複雑形状部への適用も可能であり、適用対象となる機器、部位は広い範囲にわたる。従って、WJPにより応力改善効果を期待する範囲（例えば溶接線からの範囲）及び応力改善効果は、適用機器、部位に応じて設定し、効果を決定する基本因子の条件を選定する必要がある。

なお、残留応力改善効果と壊食量はキャビテーションの強さに依存する。そこで、以降のキャビテーションの効果説明においては、壊食量をキャビテーション強さを表わす指標とみなして、壊食量で表わされたデータも使用することとする。WJP施工条件は、残留応力改善が得られ、かつ、壊食が生じない条件に設定されている。

解説表 4-1 WJPの前提条件及び基本支配因子

No	基本支配因子	項目	確認項目
1	前提条件	1) 噴射流体：水	—
		2) 周囲流体：水	
2	キャビテーション発生に関する 基本支配因子 キャビテーション係数： σ $\sigma = (P_0 - P_v) / (0.5 \times \rho \times v^2)$	1) 下流部圧力： P_0	—
		2) 流体の蒸気圧： P_v	—
		3) 流体の密度： ρ	—
		4) 流速： v	①ノズル形状
②噴射流量	○		
3	残留応力改善に関する 基本支配因子	1) 噴射距離	○
		2) 噴射時間	○
		3) 噴射角度	○

a) 前提条件

W J Pは水中で高圧水を噴射する工法であるため、前提条件は下記となる。

- ①噴射流体：水
- ②周囲流体：水

b) キャビテーション発生に関する基本支配因子

(1) キャビテーション係数

キャビテーションの発生度合については、キャビテーション係数で表すことが可能であり、キャビテーション係数が小さくなるほど、キャビテーションの発生が激しくなる。キャビテーション係数 (σ) については、非圧縮性流体のエネルギー保存則のベルヌーイ式に基づき、次式で表される (※)。

$$\sigma = (P_0 - P_v) / (0.5 \times \rho \times v^2) \quad \dots \dots \dots (4-1)$$

P_0 : ノズル下流側の圧力

P_v : 流体の蒸気圧

ρ : 流体の密度

v : 流速

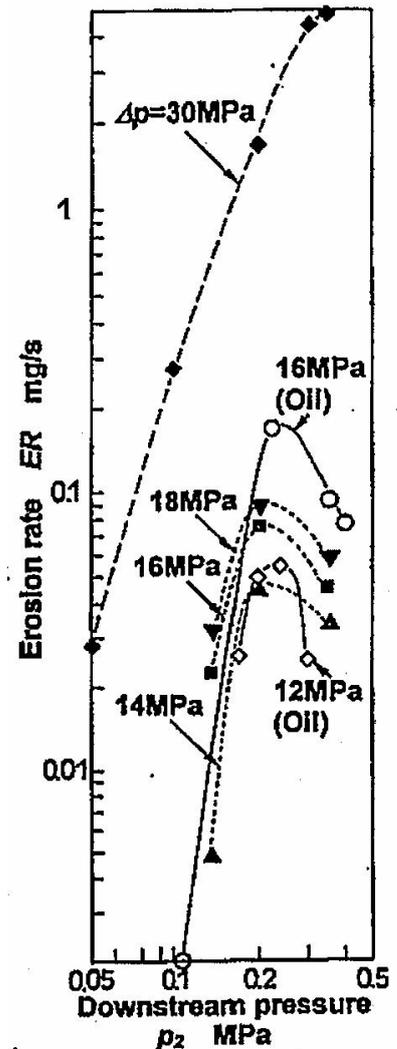
(※) 出典：祖山 均、噴流工学 Vol. 15、No. 2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

① ノズル下流の圧力： P_0 。

ある圧力までは、キャビテーション気泡が崩壊する下流の圧力 P_0 が高いほど、崩壊気泡とその周囲の圧力差が大きいため、気泡は激しく崩壊し、衝撃力も大きくなる。解説図 4-1 はキャビテーション噴流による壊食率と下流側圧力の関係を試験した結果である。ノズル上流側と下流側の圧力差 Δp を一定にしてノズル下流側圧力 P_0 （水槽の圧力）を増大すると、壊食率が増加する。しかし、更に高压にすると、ある圧力から壊食率は減少することが報告されている。

W J P の施工条件を確認する試験は、加圧水型原子力発電所（PWR）炉内計装筒の水深は約 15～18m であるが、ノズル下流の圧力としては、炉内計装筒へ W J P を適用する場合には噴射に伴い炉内計装筒内の圧力上昇が付加される。したがって、周囲圧を模擬することを前提条件とすれば、ノズル下流の圧力はノズル形状および流量により決まることから確認項目とはならない。

解説図 4-1 壊食率に対する下流側圧力の影響
出典：祖山 均、噴流工学 Vol. 15, No. 2 (1998)
31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子



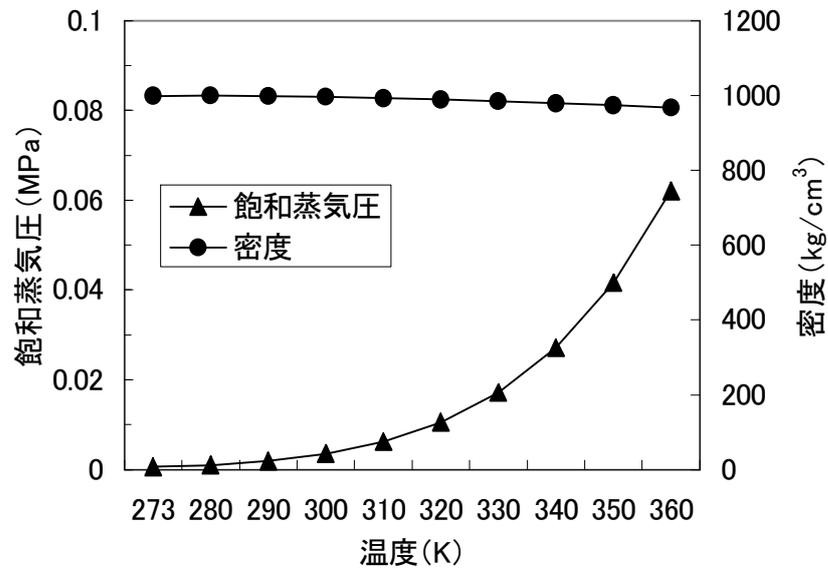
② 流体の蒸気圧： P_v 、及び流体の密度： ρ

流体の蒸気圧と流体の密度は、水温によって決まる。解説図 4-2 に水の物性値を示す。飽和蒸気圧は温度と共に高くなるのに対して、密度は逆に小さくなるが、温度による変化率は飽和蒸気圧の方が大きい。このため、温度が高くなるとキャビテーション係数 σ が小さくなることとなり、キャビテーションは発生しやすくなる。

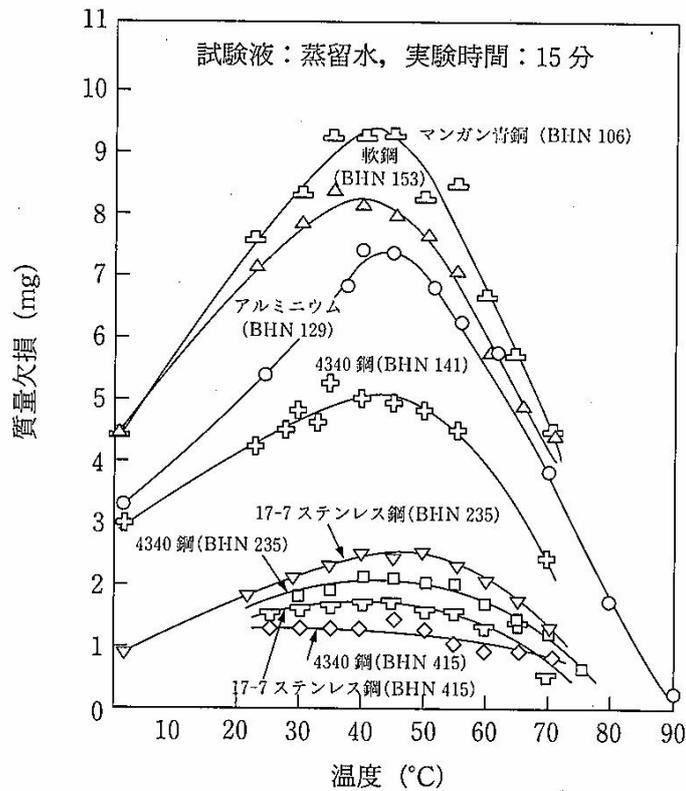
解説図 4-3 に壊食量と温度の関係を示す。壊食量は温度の上昇と共に大きくなっているが、50℃前後からは減少しており、キャビテーションによる衝撃力が50℃前後で最も大きくなることを示している。これは、温度が高くなると蒸気がクッション効果を果しキャビテーション崩壊時の衝撃力が弱まるためである。

W J P の施工条件を確認する試験は常温で実施されるため、50℃以下である。一方、加圧水型原子力発電所（PWR）用機器へ W J P を適用する場合の水温は、既に運転中の炉水の温度が高いと考えられるが、定期検査中の炉水は通常50℃以下に管理されている。その他の場合には、定期検査中の炉水よりも水温は低い条件となり、W J P の施工条件選定試験における水温と同程度である。よって、W J P の施工条件は、加圧水型原子力発電所（PWR）用機器へ W J P を適用する場合と同等、若しくは保守的な条件で実施した試験を基にして選定していると言える。

これより、加圧水型原子力発電所（PWR）用機器へのW J P適用時には、ノズル下流の水温は確認項目とはならない。



解説図 4-2 水の飽和蒸気圧と密度



解説図 4-3 壊食量に対する温度の影響

出典：加藤 洋治編著 「新版キャビテーション」 槇書店

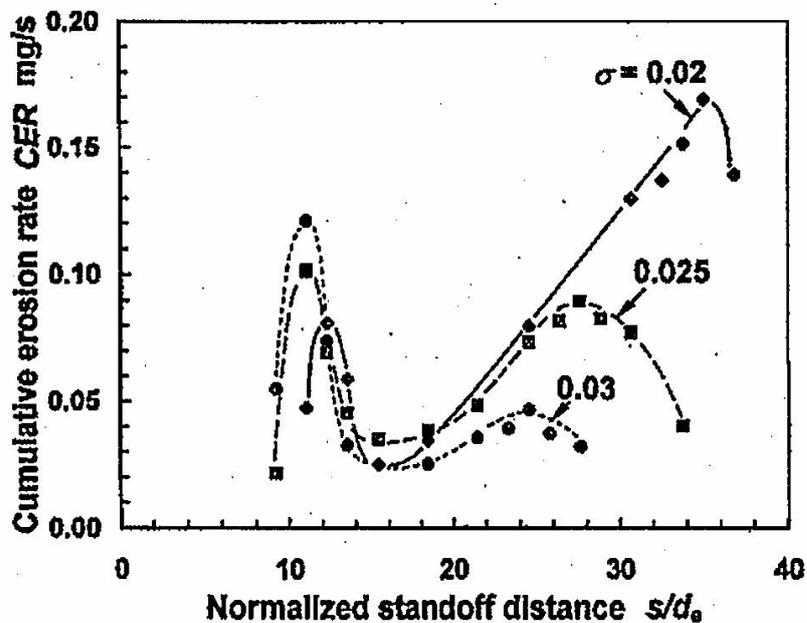
③ 流速：v

流速は、式(4-1)に示すようにキャビテーション気泡発生を支配する基本支配因子であり、ノズル形状(ノズル径とノズル穴数)と噴射流量によって決まる。よって、ノズル形状と噴射流量は確認項目となる。

c) 残留応力改善に関する基本支配因子

(1) 噴射距離

解説図4-4にキャビテーション噴流による典型的な壊食曲線を示す。ここでは、噴射距離(s)をノズル径(d)で割ったスタンドオフ距離で評価されている。壊食量はスタンドオフ距離の増大に伴い2つのピークを持っているが、キャビテーションが主として係るのは下流側の第2ピークである。従って、キャビテーション噴流により材料表面改質を行うためには、ノズル径と噴射距離は確認項目となる。

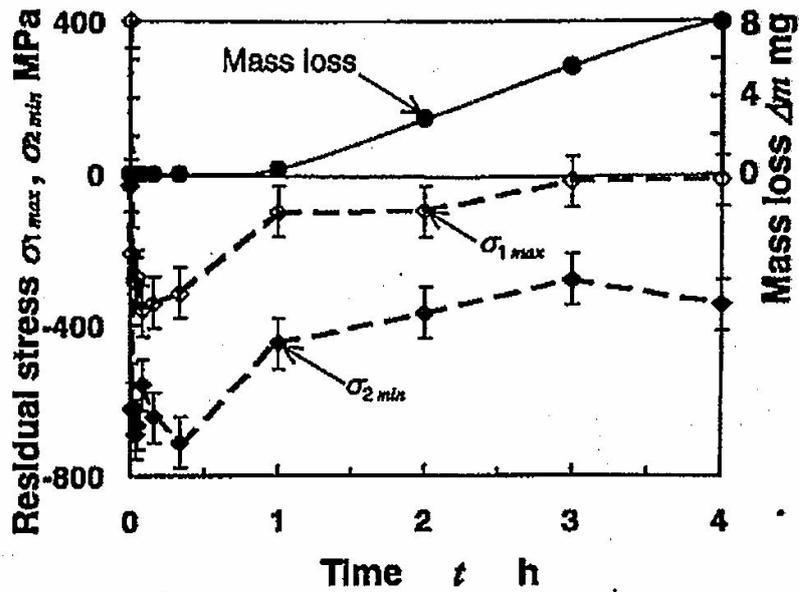


解説図 4-4 壊食曲線

出典：祖山 均、噴流工学 Vol.15、No.2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

(2) 噴射時間

解説図4-5はキャビテーション噴流による残留応力の経時変化を、質量損失を併せて示した図である。キャビテーション噴流により引張残留応力が圧縮残留応力に改善されているが、キャビテーション噴流に長時間さらして質量損失を生じるようになると、圧縮残留応力は低下して残留応力が零に漸近する。すなわち、キャビテーション噴流により残留応力を改善する場合には、最適施工時間が存在することがわかる。よって、噴射時間は確認項目となる。

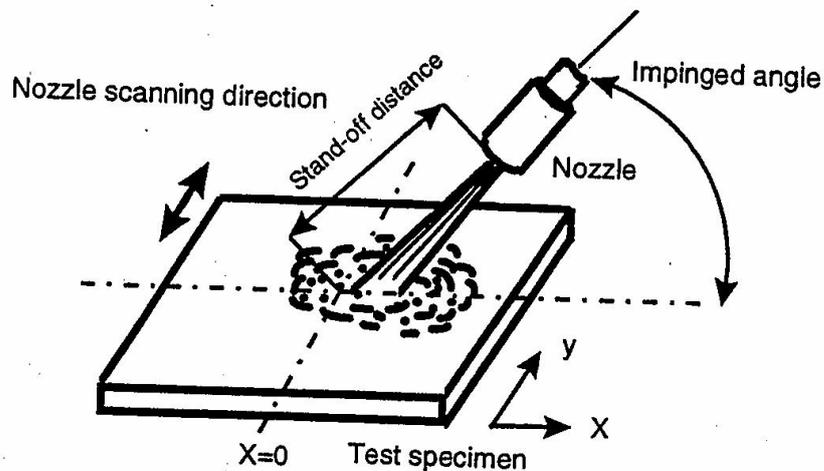


解説図 4-5 残留応力の経時変化 (SUS304)

出典：祖山 均、噴流工学 Vol.15、No.2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

(3) 噴射角度

キャビテーション噴流を施工面に対してある角度を持って噴射した場合、キャビテーションは噴流の上流側よりも下流側へ広く分布し、その様相は噴射角度に依存する。このため、W J P 施工において、残留応力改善効果は垂直に噴射した場合とある角度で噴射した場合では同一にはならない。そこで、有効な応力改善効果が得られる噴射角度を規定しておく必要がある。よって、噴射角度は確認項目となる。



解説図 4-6 W J P による斜め噴射

出典：K.Hirano, et al.: Residual Stress Improvement by Oblique Water Jet Peening : 9th International Conference Vessel Technology : 9-14 April 2000

(解説 4-5) 施工管理項目

ウォータージェットピーニングの基本支配因子に対する要求値を満足させるために、管理施工項目を設定する必要がある。これは、例えば、基本支配因子である流速は、流量やノズル径などによって決められるため、管理する項目としては、流速ではなく、流量やノズル径になってくるためである。解説表 4-2 炉内計装筒内面に施工するウォータージェットピーニングにおける管理項目の例を示す。

解説表 4-2 ウォータージェットピーニングにおける管理項目の例 (炉内計装筒内面)

施工管理項目		確認値
流速	ノズル	穴数：2個 径：約1mm
	噴射流量	約20 $\frac{\text{リットル}}{\text{分}}$
噴射距離	管内径	$\phi 10\sim 15$ mm
	ノズル穴位置	幾何学的に噴射距離が約14mmとなる位置
噴射時間	ノズル走査速度	60 mm/min
	走査回数	ノズル走査速度にあわせ、 $3\sim 14\times 10^3$ min/m ² となるように走査回数を設定
噴射角度	ノズル角度	12°

(解説 4-6) 装置仕様

実機施工における装置は、施工要領確認試験の実施により明確にした装置仕様を満足する装置とする。実機施工においては、所定の仕様となっていることを事前動作確認などで確認する。

また、施工要領確認試験で明確にした装置仕様以外の装置を使用する必要がある場合は、その差異を明確にし、適切な技術的評価を実施することにより使用可能とすることができる。

(解説 4-7) 施工による周辺部への影響

施工対象部位およびその施工対象部に接合された部材は、ウォータジェットピーニングにより以下の影響が考えられる。

- (1) ウォータジェットピーニング施工部とその近傍には、高速ジェット流による流体力とキャビテーション衝撃圧による加振力が直接作用する。
- (2) ウォータジェットピーニングによる加振力によって施工対象部には振動が生じることから、施工対象部に接合された他の部材に振動が伝わる。ウォータジェットピーニングによる加振力の周波数近傍に固有振動数を持つ構造物については共振する可能性がある。

なお、PWRでのウォータジェットピーニング対象である原子炉容器炉内計装筒内面、原子炉容器炉内計装筒外面、原子炉容器炉内計装筒J溶接部、原子炉容器出入口管台、原子炉容器安全注入管台および原子炉容器安全注入配管においては、その影響範囲に問題となる構造物はないことを確認している。

(解説 5-1) 施工後の確認

施工後の確認としては、期待する応力改善効果が得られていることを噴射ノズルの劣化度合いを確認し（ノズル穴径などに変化がないかの確認）、施工条件が施工前から著しく変わっていないかを確認するものである。また、施工表面に異常が生じていないことを目視試験（VT-3）、または非破壊検査（ECTなど）にて確認する。

BWR 予防保全工法ガイドライン

[ウォータージェットピーニング工法]

1. 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）用機器の応力腐食割れ（SCC）に対する予防保全を目的としたウォータージェットピーニング工法（以下W J P）について定めたものである。（解説 1-1）

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用機器等に適用する。（解説 1-2）

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。

2. 工法の概要

W J Pは、高圧水を水中でノズルから噴射することにより、発生させたキャビテーションが崩壊する際に発生する衝撃圧力で施工対象の表面を押圧し、表面に圧縮残留応力を生成し、材料表面の引張残留応力を圧縮残留応力に改善する技術である。（解説 2-1、2-2）

高圧水を水中で噴射すると、噴流界面のせん断層内に生じる渦の低圧部にキャビテーション気泡が発生する。キャビテーション気泡は下流側で周囲水の圧力回復により崩壊し、衝撃波と液体マイクロジェット衝突により、非常に大きな衝撃圧力が発生する。この衝撃圧力によって材料の表面層に塑性変形（押し延ばし）が発生する。この塑性変形は周囲から弾性的に拘束されるため、圧縮残留応力が生成する。

W J Pは、キャビテーションを含むジェット水で材料表面のピーニングを行うため、噴射ノズル口径・形状、噴射流量、噴射距離、噴射時間及び噴射角度が残留応力改善の影響因子となる。

一般に、引張応力はSCCが発生するための必要条件であり、引張残留応力を圧縮残留応力に改善できるW J Pは極めて有効な予防保全対策と位置付けられる。

また、W J Pは、キャビテーションジェットが部材に当たった後の反射噴流や回り込み噴流、隙間部への吹込み噴流等も残留応力改善に利用できるため、狭隘部や複雑形状部への施工性が高い。

3. 工法適用の条件

本ガイドラインは、耐SCC性改善のために、部材表面に発生する引張残留応力を圧縮残留応力へと転換させるW J P工法に適用する。本予防保全工法の適用条件として、確性試験又はこれに準じた確認試験が実施されている場合を除いて、以下の項目について事前に施工要領確認試験を実施し、施工法を確立しておくこと。

(事前の実施・確立事項)

- (1) 施工条件に関する確認項目(解説 3-1)についての施工要領確認試験を実施する。
なお、施工要領確認試験は、日本機械学会維持規格 (JSME S NA1-2004) の RB-2450 ピーニング方法 (注 1) に準じるものとする。

(注 1) : (社) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格、
JSME S NA1-2004 」(2004 年版)

- (2) 適用箇所施工前目視確認方法 (解説 4-1)
- (3) 施工後の効果確認方法については、施工後に直接的に確認することはできないため、事前に実機形状模擬試験片を用いて WJP を施工し、残留応力が改善されることを確認することにより工法の妥当性を確認する。なお、試験は上記 (1) による。

なお、工法適用に当たり、4 章に示す工法に対して期待する効果に影響を及ぼす基本的な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。(解説 3-1)

4. 工法適用に対する要求事項

4. 1 工法適用にあたっての前提条件

本予防保全工法を適用するための前提条件は以下とする。(解説 3-1)

- (1) W J P は水中で高圧水を噴射する工法であるため、前提条件は下記となる。
 - ①噴射流体：水
 - ②周囲流体：水
- (2) 対象は、内部又は外部に水を保有する BWR 用機器等とする。

4. 2 工法に対する要求事項

本予防保全工法を適用するにあたり、以下の要求事項が 3 章で確認された条件を満たしていることを確認すること。

- (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 (解説 4-1)
- (2) 適用対象部位の材料、形状、取合い寸法等の確認
- (3) 基本支配因子における管理項目の要求値の確認 (解説 3-1)

4. 3 使用装置に対する要求事項

3 章 (1) にて実施する施工要領確認試験を実施する際に、装置仕様 (要求事項) を明確にし、特に、施工面の引張残留応力を圧縮応力以下に低減するために、噴射流量、噴射距離、噴射時間及び噴射角度を制御できる装置であることを確認すること。

4. 4 オペレータに対する要求事項

本予防保全工法に関するオペレータの技量としては、装置の施工対象部位への設定、WJP ノズルの走行・位置の設定及び操作盤の操作・運転などが考えられる。

したがって、オペレータの技量の確認及び関連作業との確認を含め、実機施工の一連の施工手順をモックアップなどでトレーニングを受ける必要がある。

4. 5 工法適用にあたっての注意事項

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およびその施工対象部に接合された部材は、施工前に影響を適切に評価するか、もしくは、施工後に健全性について確認のこと。(解説 4-3)

5. 施工後の確認

本予防保全工法の施工後、上記4. 2項の工法に対する要求事項を満足することを確認すること(施工中確認(解説 4-2)を含む)。また、目視試験(VT-1)により、施工面に異常がないことを確認すること。(解説 5-1)

6. 適用フロー

WJPの適用フローを図1に示す。

施工面のうち、施工前の目視試験により割れ等の有害な欠陥がないことが確認された範囲は、各機器の点検評価ガイドラインに記載された点検周期の設定において、WJPによるSCC予防保全効果が有効な範囲として扱うことができる。(解説 6-1)

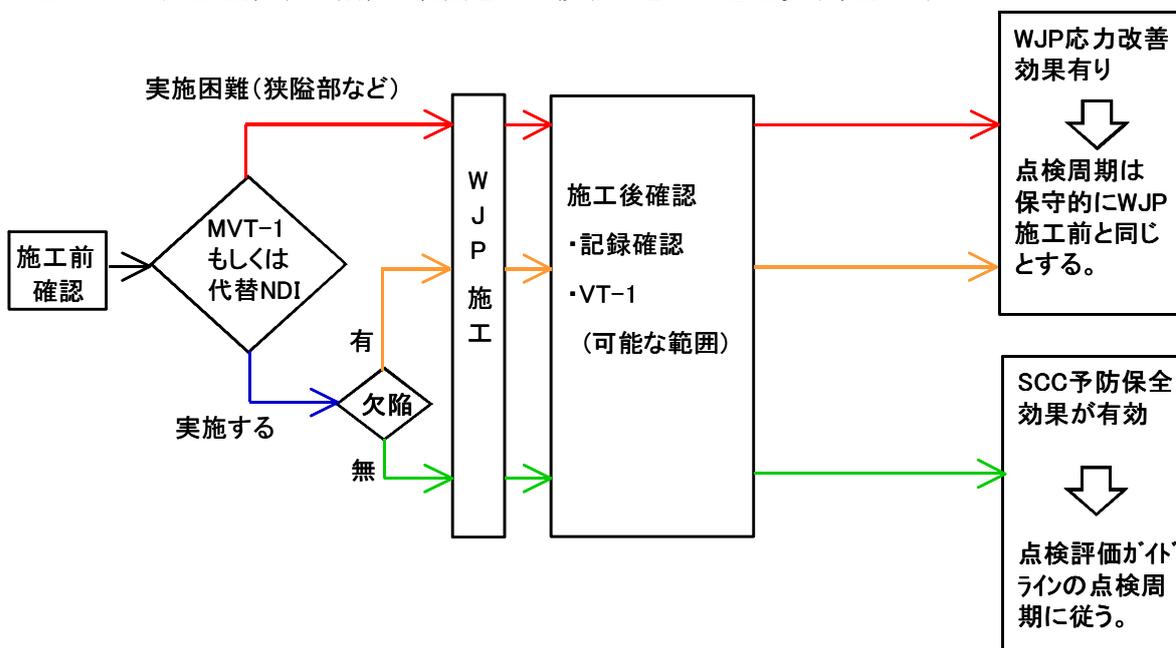


図 1 WJP適用フロー

(解説 1-1) 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、予防保全工法に関して、機器の安全上要求される機能の維持に有効な施工管理項目と施工管理条件を示すことを目的とする。

(解説 1-2) 適用材料

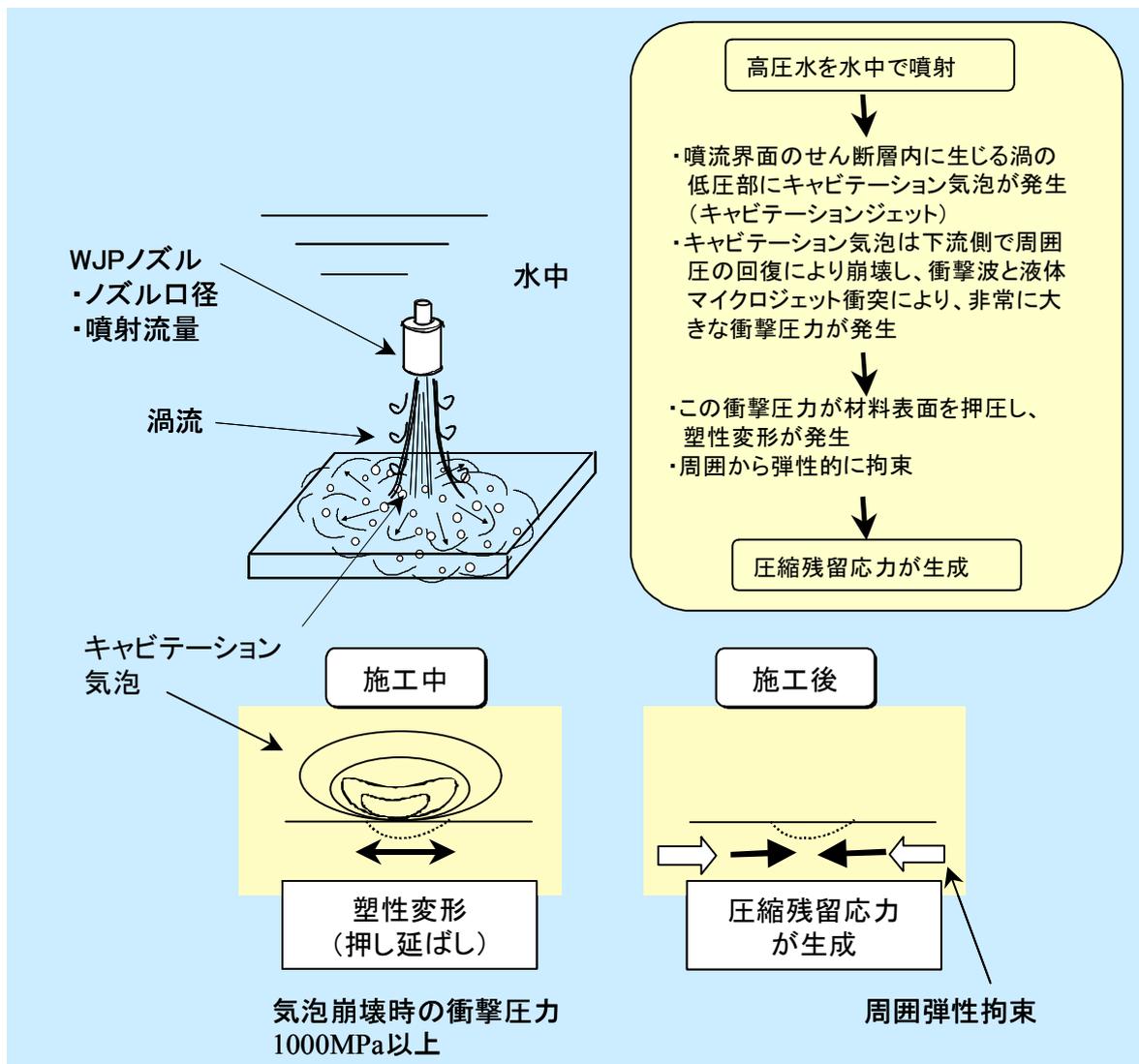
沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金に対して、W J Pによって残留応力改善効果があることが確認されている。また、母材ばかりでなく、溶接熱影響部及び溶接金属に対しても有効であり、以下に示す材料と加工方法他の組合せに対して、残留応力改善効果があることが試験によって確認されている。

加工方法他 材料	オーステナイト系 ステンレス鋼	高ニッケル合金
一般溶接部（As-Weld）	○	○
冷間加工部 （機械加工，研削加工）	○	○
放電加工（EDM）部	○	—
照射材	○	—

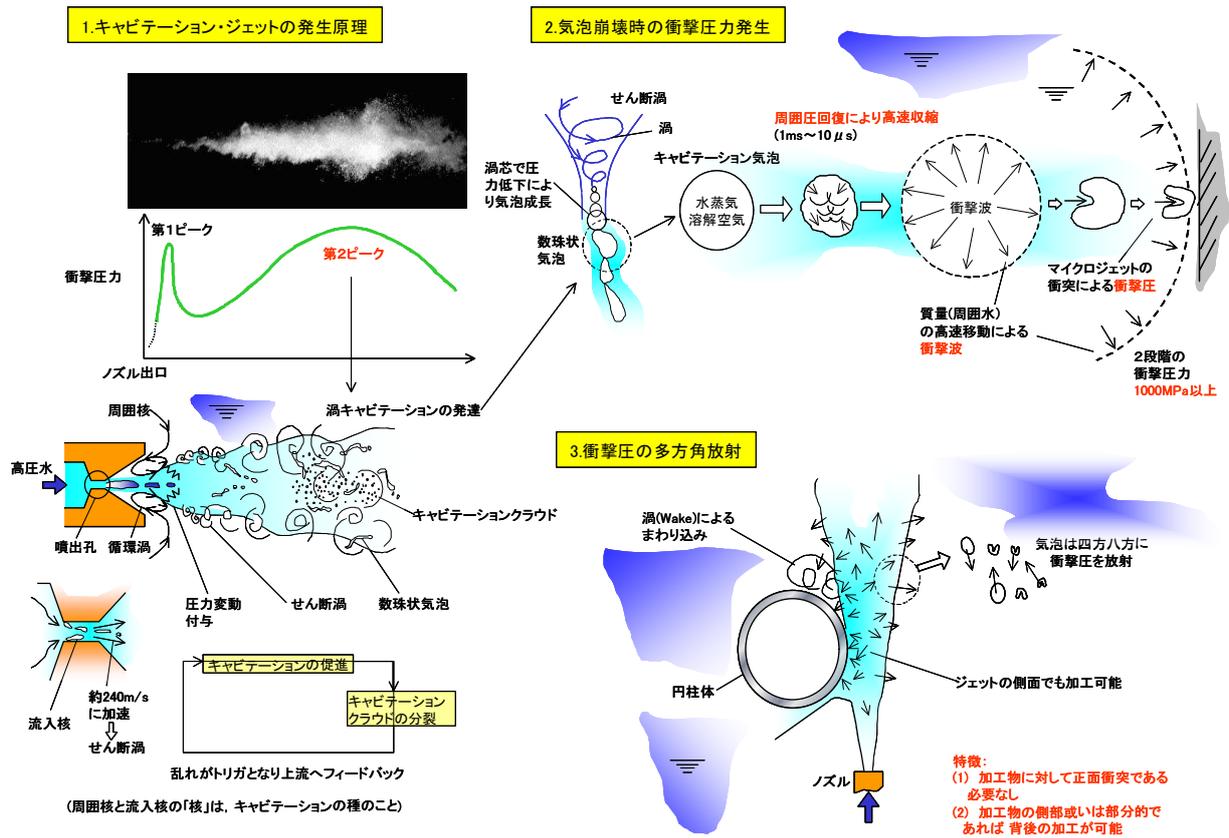
○：試験により有効性が確認されているもの

(解説 2-1) W J P の原理

W J P は、高圧水を水中でノズルから噴射することにより発生させたキャビテーションを含むジェットで、機器表面をピーニングする技術である。このW J P の原理を、解説図 2-1(1)及び(2)に示す。



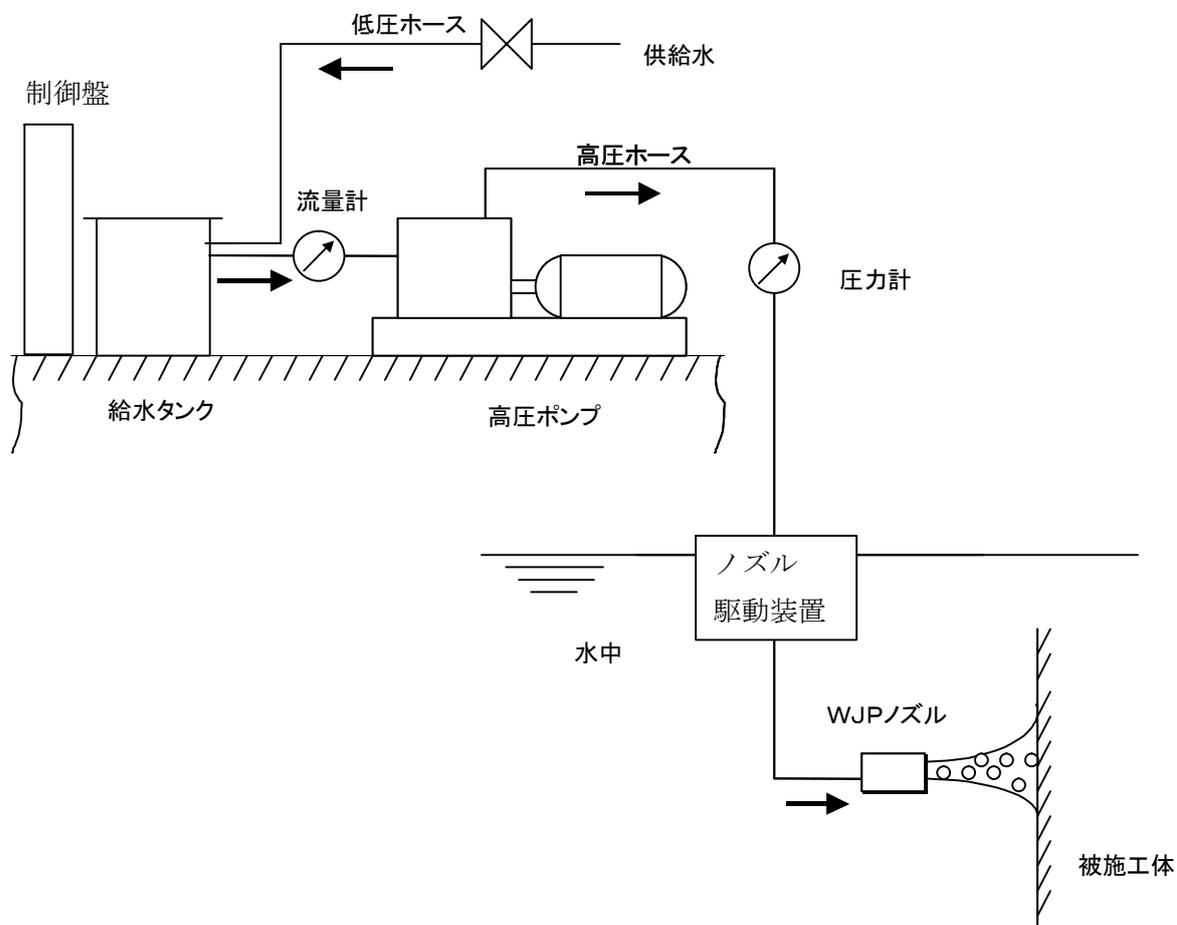
解説図 2-1(1) W J P の原理



解説図 2-1(2) WJPのキャビテーションジェットについて

(解説 2-2) W J P 装置の基本構成

W J P を被施工体に適用する場合の W J P 装置の基本構成を解説図 2-2 に示す。



解説図 2-2 W J P 装置の基本構成

(解説 4-1) 施工条件に関する確認項目

W J Pは、キャビテーションの崩壊時に発生する高い衝撃圧力で機器表面を押圧することにより引張残留応力を低減させるか、または圧縮残留応力へと転換させる工法である。W J Pの施工条件に関する前提条件と基本支配因子を解説表4-1(1)に示す。各基本支配因子の中で、W J Pの施工対象を沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器とした場合について検討を実施し、その中でピーニング効果を決定する基本支配因子のみを確認項目とした。

W J Pは、キャビテーションジェットが部材に当たった後の反射噴流や回り込み噴流、隙間部への吹込み噴流等も残留応力改善に利用できることから、狭隘部や複雑形状部への適用も可能であり、適用対象となる機器、部位は広い範囲にわたる。従って、W J Pにより応力改善効果を期待する範囲（例えば溶接線からの範囲）及び応力改善効果は、適用機器、部位に応じて設定し、効果を決定する基本支配因子の条件を選定する必要がある。

なお、残留応力改善効果と壊食量はキャビテーションの強さに依存する。そこで、以降のキャビテーションの効果説明においては、壊食量をキャビテーション強さを表わす指標とみなして、壊食量で表わされたデータも使用することとする。W J P施工条件は、残留応力改善が得られ、かつ、壊食が生じない条件に設定されている。

解説表 4-1(1) W J Pの前提条件及び基本支配因子

No	基本支配因子	項目	確認項目
1	前提条件	1) 噴射流体：水	
		2) 周囲流体：水	
2	キャビテーション発生に関する 基本支配因子 キャビテーション係数： σ $\sigma = (P_0 - P_v) / (0.5 \times \rho \times v^2)$	1) 下流部圧力： P_0	—
		2) 流体の蒸気圧： P_v	—
		3) 流体の密度： ρ	—
		4) 流速： v	①ノズル 仕様
②噴射 流量	○		
3	残留応力改善に関する 基本支配因子	1) 噴射距離	○
		2) 噴射時間	○
		3) 噴射角度	○

a) 前提条件

W J Pは水中で高圧水を噴射する工法であるため、前提条件は下記となる。

- ①噴射流体：水
- ②周囲流体：水

b) キャビテーション発生に関する基本支配因子

(1) キャビテーション係数

キャビテーションの発生度合については、キャビテーション係数で表すことが可能であり、キャビテーション係数が小さくなるほど、キャビテーションの発生が激しくなる。キャビテーション係数 (σ) については、非圧縮性流体のエネルギー保存則のベルヌーイ式に基づき、次式で表される (※)。

$$\sigma = (P_0 - P_v) / (0.5 \times \rho \times v^2) \quad \dots \dots \dots (4-1)$$

P_0 : ノズル下流側の圧力

P_v : 流体の蒸気圧

ρ : 流体の密度

v : 流速

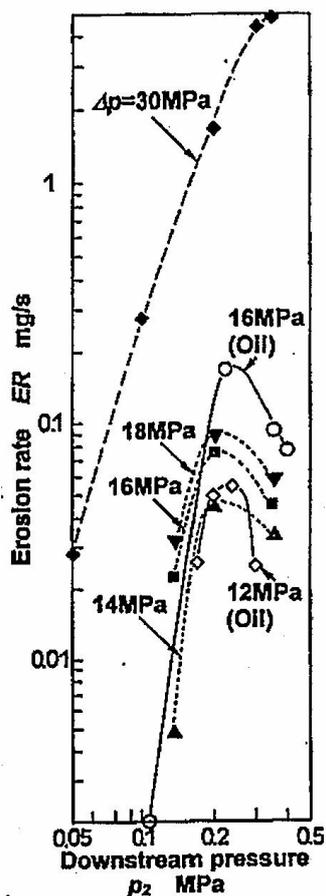
(※) 出典：祖山 均、噴流工学 Vol.15、No.2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

① ノズル下流の圧力： P_0

ある圧力までは、キャビテーション気泡が崩壊する下流の圧力 P_0 が高いほど、崩壊気泡とその周囲の圧力差が大きいため、気泡は激しく崩壊し、衝撃力も大きくなる。解説図 4-1(1)はキャビテーション噴流による壊食率と下流側圧力の関係を試験した結果である。ノズル上流側と下流側の圧力差 Δp を一定にしてノズル下流側圧力 P_0 （水槽の圧力）を増大すると、壊食率が増加する。しかし、更に高圧にすると、ある圧力から壊食率は減少することが報告されている。

W J Pの施工条件を確認する試験は水槽で実施されるため水深は数m程度であり、周囲圧は0.05MPa以下である。一方、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器への適用を考えた場合、周囲圧が大きくなる場合として、原子炉圧力容器の底部での適用が考えられる。原子炉圧力容器の底部水深は約26mであり、周囲圧は0.3MPa程度である。その他の場合は原子炉圧力容器の底部よりも周囲圧は低い条件となり、水深が浅い状態でW J P施工する場合でも、周囲圧はW J Pの施工条件選定試験における周囲圧と同程度である。よって、W J Pの施工条件は、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器へW J Pを適用する場合と同等、若しくは保守的な条件で実施した試験を基にして選定されていると言える。

これより、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器へのW J P適用時には、ノズル下流の圧力は確認項目とはならない。



解説図 4-1(1) 壊食率に対する下流側圧力の影響

出典：祖山 均、噴流工学 Vol.15、No.2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

② 流体の蒸気圧： P_v 、及び流体の密度： ρ

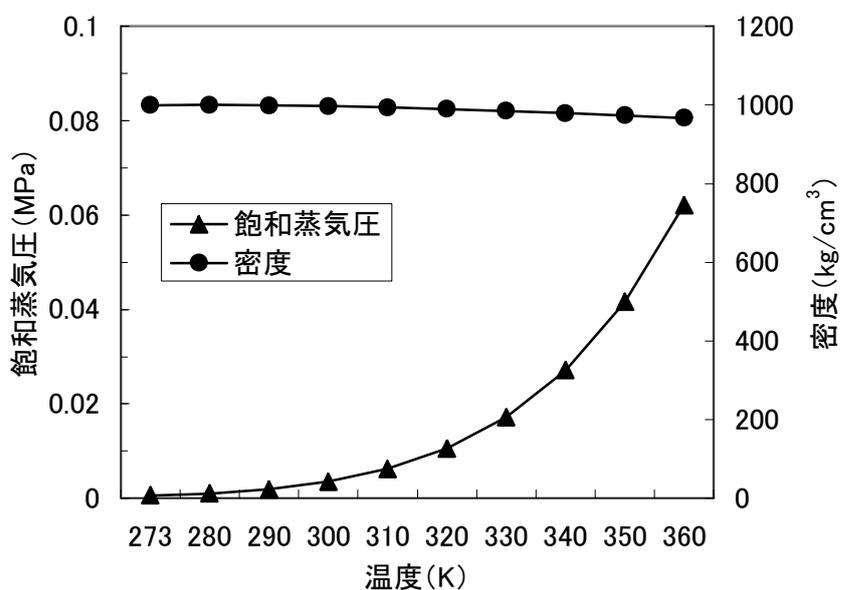
流体の蒸気圧と流体の密度は、水温によって決まる。解説図 4-1(2)に水の物性値を示す。飽和蒸気圧は温度と共に高くなるのに対して、密度は逆に小さくなるが、温度による変化率は飽和蒸気圧の方が大きい。このため、温度が高くなるとキャビテーション係数 σ が小さくなることとなり、キャビテーションは発生しやすくなる。

解説図 4-1(3)に壊食量と温度の関係を示す。壊食量は温度の上昇と共に大きくなっているが、50℃前後からは減少しており、キャビテーションによる衝撃力が50℃前後で最も大きくなることを示している。これは、温度が高くなると蒸気がクッション効果を果しキャビテーション崩壊時の衝撃力が弱まるためである。

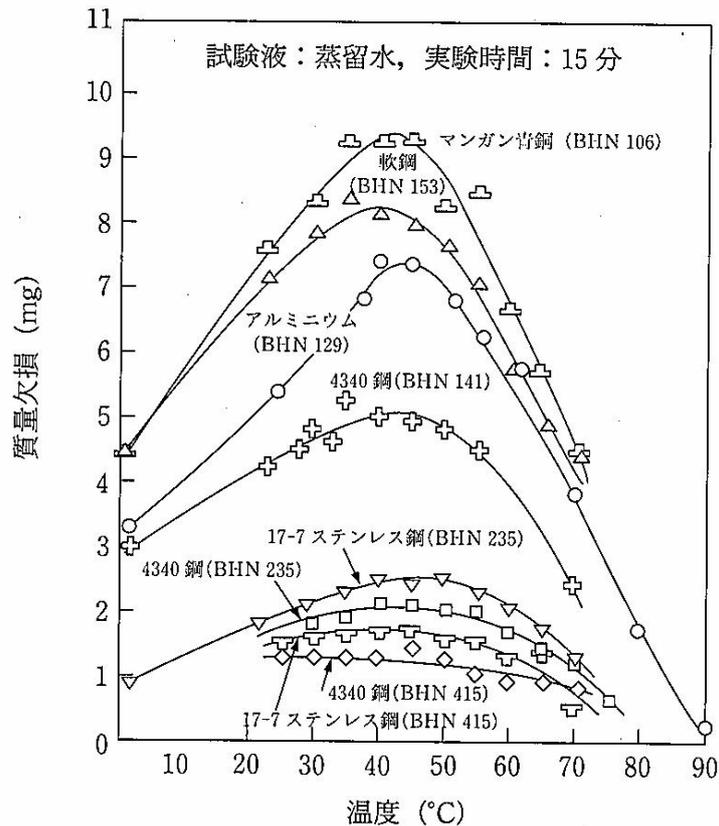
W J Pの施工条件を確認する試験は常温で実施されるため、50℃以下である。一方、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器へW J Pを適用する場合の水温は、既に運転中の炉水の温度が高いと考えられるが、定期検査中の炉水は通常50℃以下に管

理されている。その他の場合には、定期検査中の炉水よりも水温は低い条件となり、W J Pの施工条件選定試験における水温と同程度である。よって、W J Pの施工条件は、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器へW J Pを適用する場合と同等、若しくは保守的な条件で実施した試験を基にして選定していると言える。

これより、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器へのW J P適用時には、ノズル下流の水温は確認項目とはならない。



解説図 4-1(2) 水の飽和蒸気圧と密度



解説図 4-1(3) 壊食量に対する温度の影響

出典：加藤 洋治編著 「新版キャビテーション」 槇書店

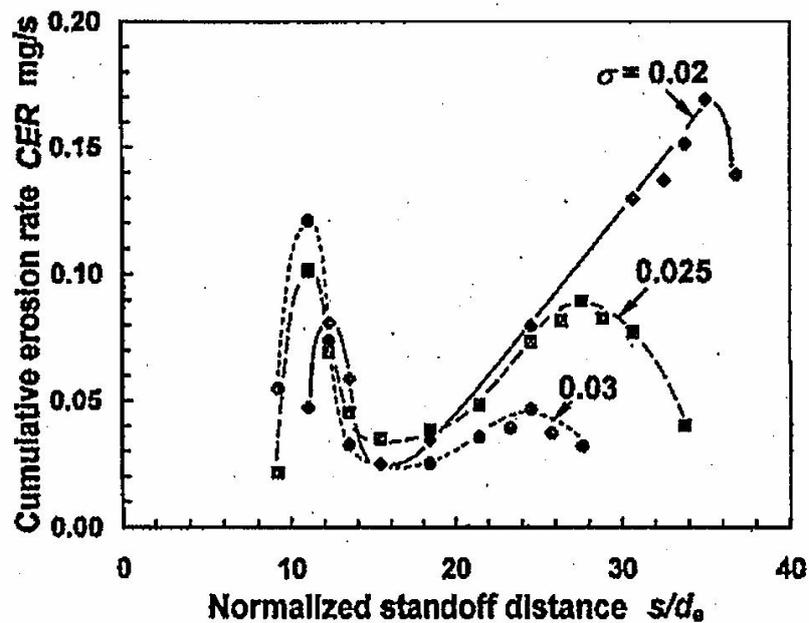
③ 流速： v

流速は、式(4-1)に示すようにキャビテーション気泡発生を支配する基本支配因子であり、ノズル形状(ノズル径とノズル穴数)と噴射流量によって決まる。よって、ノズル形状と噴射流量は確認項目となる。

c) 残留応力改善に関する基本支配因子

(1) 噴射距離

解説図 4-1(4)にキャビテーション噴流による典型的な壊食曲線を示す。ここでは、噴射距離(s)をノズル径(d)で割ったスタンドオフ距離で評価されている。壊食量はスタンドオフ距離の増大に伴い2つのピークを持っているが、キャビテーションが主として係るのは下流側の第2ピークである。従って、キャビテーション噴流により材料表面改質を行うためには、ノズル径と噴射距離は確認項目となる。

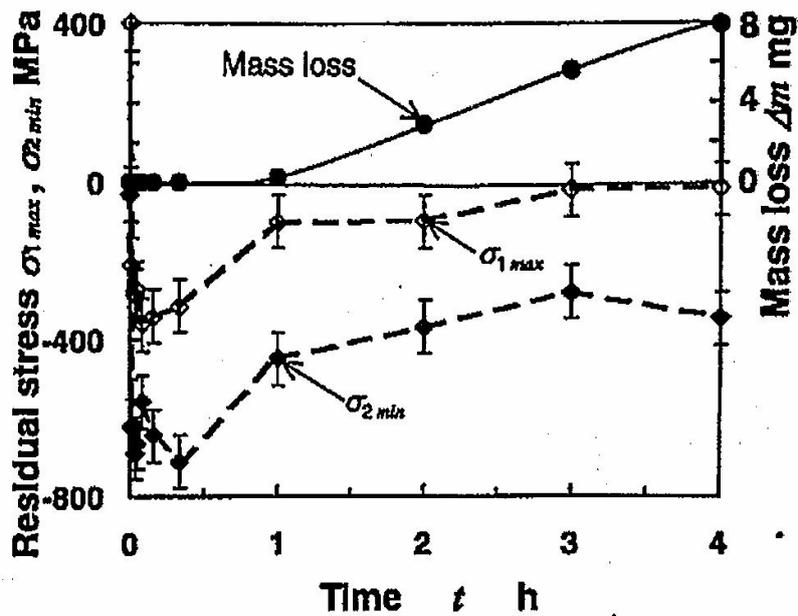


解説図 4-1(4) 壊食曲線

出典：祖山 均、噴流工学 Vol.15、No.2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

(2) 噴射時間

解説図 4-1(5)はキャビテーション噴流による残留応力の経時変化を、質量損失を併せて示した図である。キャビテーション噴流により引張残留応力が圧縮残留応力に改善されているが、キャビテーション噴流に長時間さらして質量損失を生じるようになると、圧縮残留応力は低下して残留応力が零に漸近する。すなわち、キャビテーション噴流により残留応力を改善する場合には、最適施工時間が存在することがわかる。よって、噴射時間は確認項目となる。

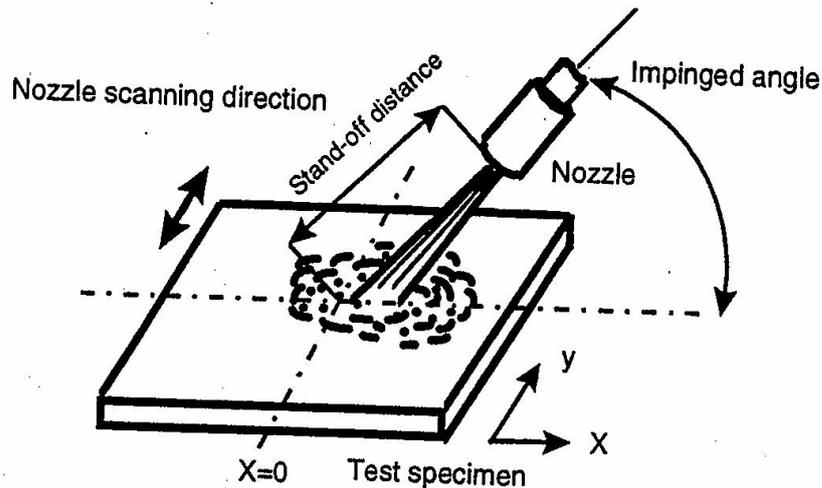


解説図 4-1(5) 残留応力の経時変化 (SUS304)

出典：祖山 均、噴流工学 Vol.15、No.2 (1998) 31-37 キャビテーション噴流における材料試験・表面改質における支配因子

(3) 噴射角度

キャビテーション噴流を施工面に対してある角度を持って噴射した場合、キャビテーションは噴流の上流側よりも下流側へ広く分布し、その様相は噴射角度に依存する。このため、WJP施工において、残留応力改善効果は垂直に噴射した場合とある角度で噴射した場合では同一にはならない。そこで、有効な応力改善効果が得られる噴射角度を規定しておく必要がある。よって、噴射角度は確認項目となる。



解説図 4-1(6) W J Pによる斜め噴射

出典：K.Hirano, et al.: Residual Stress Improvement by Oblique Water Jet Peening : 9th International Conference Vessel Technology : 9-14 April 2000

d) 基本支配因子の確認項目

a)~c)より, W J P施工においては, 流速に関係するノズル形状や噴射流量、衝撃圧力を有効に利用するための噴射時間、噴射距離及び噴射角度などがピーニング効果を決めるパラメータとなることから、以下の基本支配因子を確認項目とした。

(0) 前提条件

噴射流体及び周囲流体ともに水とする。

(1) ノズル仕様

キャビテーションの発生に影響を及ぼす流速に関係するためノズル仕様を確認項目とした。ここでいう形状とは、流路を形成するノズル口径、及びノズル穴数である。

(2) 噴射流量

キャビテーションの発生に影響を及ぼす流速に関係するため噴射流量を確認項目とした。

(3) 噴射距離

キャビテーション噴流による衝撃力はある距離でピークを持つことが報告されており、距離により衝撃力が変化するため噴射距離を確認項目とした。

(4) 噴射時間

W J Pによる残留応力改善には、適正な噴射時間が存在することが報告されているため噴射時間を確認項目とした。

(5) 噴射角度

噴射角度（ノズルと機器表面の角度）が浅くなる場合には、噴射距離、噴射時

間が同じでも被施工面で受けるエネルギーが小さくなり、表面の圧縮残留応力形成に影響を与えるため確認項目とした。

上記項目において設定した施工条件を超える過度のピーニング等により、材料への悪影響を与えないことを確認する必要がある場合には、施工の重ね合わせや長時間施工等に対する噴射時間の制限を設ける。

なお、解説表 4-1(2)の条件であれば、4. 2項に示す要求事項を満足すること、及び材料に悪影響を与えないことが、(財) 発電設備技術検査協会にて行われた確性試験において確認されている。

解説表 4-1(2) 確性試験において確認されている条件

	噴射角度 (°)	噴射距離 (mm)	噴射時間 (min/m)	噴射流量 (l/min)
走行方向	15 以上 45 未満	80~140	30~60	45~49
	45 以上 90 以下	80~200	20~60	41~49
直交方向	15 以上 80 未満	80~140	30~60	45~49
	80 以上 90 以下	80~200	20~60	41~49
ノズル	噴射口径 2mm のホーンノズル(穴数：1)			
噴射時間の制限	重ね合わせ：240min/m 以下			
	停止施工：2min 以下			

(解説 4-2) 施工前目視試験

点検周期の設定において、SCC発生に対する予防保全効果が有効な範囲とするためには、施工前目視試験(MVT-1)により割れ等の有害な欠陥が認められないことを確認しておく必要がある。施工前目視試験が実施困難な部位に対しては、非破壊検査手法によって代替することができる。

(解説 4-3) 施工中確認要求

W J P 施工中は要求事項である噴射流量、及び噴射時間が適正な範囲にあることを確認する。噴射距離、及び噴射角度は施工終了後の状態が施工開始前に確認された状態と同等であることの確認により代替することができる。

(解説 4-4) 施工後の確認

W J P 施工後に、施工前及び施工中の確認事項を満足していることを記録にて確認する。なお、施工後目視試験 (V T - 1) は実施可能な範囲について行うものとする。

(解説 4-5) 施工による周辺部への影響

施工対象部位及びその施工対象部に接合された部材は、ウォータジェットピーニングにより以下の影響が考えられる。

- (1) ウォータジェットピーニング施工部とその近傍には、高速ジェット流による流体力とキャビテーション衝撃圧による加振力が直接作用する。
- (2) ウォータジェットピーニングによる加振力によって施工対象部には振動が生じることから、施工対象部に接合された他の部材に振動が伝わる。ウォータジェットピーニングによる加振力の周波数近傍に固有振動数を持つ構造物については共振する可能性がある。

(解説 5-1) 点検周期設定における施工範囲の扱い

施工前の目視試験において、割れ等の有害な欠陥が認められなかった範囲は、W J P による表面の圧縮応力付与により S C C 感受性が低下するため、点検周期の設定において、予防保全効果の有効な範囲として扱うことができる。具体的な扱いについては、各機器の点検評価ガイドラインに従う。

施工前の目視試験において割れが認められた範囲についても、表面に圧縮応力が付与されたことにより、S C C き裂進展を抑制する効果があるものと考えられるが、割れの両端からのき裂進展評価において、保守的に W J P 施工前と同等に扱うものとする。

予防保全工法ガイドライン

[レーザピーニング工法]

1. 目的および適用

1. 1 目的

本ガイドラインは、軽水炉用機器の応力腐食割れ（SCC）に対する予防保全を目的としたレーザピーニング工法（以下、LPと略す）について定めたものである。（解説 1-1）

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および高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）を使用している軽水炉用機器に適用する。（解説 1-2）

1. 2. 2 適用時期

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

2. 工法の概要

LPは、パルス発振のレーザを水中または水膜で覆われた材料に照射したとき、表面に発生する高圧プラズマの衝撃圧力で施工対象の表面を押圧し、表面の残留応力状態を引張から圧縮に改善する技術である。（解説 2-1、2-2）

強いレーザパルスを照射すると、アブレーション作用により材料の表面に高圧の金属プラズマが発生する。水中または水膜がある状態では水の慣性が働いてプラズマの膨張が抑制されるため、狭い空間にレーザパルスのエネルギーが集中し、圧力数 GPa のプラズマが形成される。この衝撃圧力によって材料の表面は塑性変形（押し伸ばし）を受け、周囲から弾性的に拘束されるため、材料の表面に圧縮残留応力が形成される。

LPは、レーザアブレーション作用による高圧プラズマの衝撃圧力を利用してピーニングを行うため、照射するレーザのパルスエネルギー密度（パルスエネルギーおよび照射スポット径）および単位面積に照射するレーザのパルス数（照射回数）が残留応力改善の影響因子となる。

一般に、SCCを発生させる一因子である接液部表面の引張残留応力を圧縮残留応力に改善できるLPは、SCCに対する有効な予防保全工法と位置付けられる。

また、LPは、レーザ1パルスのエネルギーがショットピーニングの1ショットの運動エネルギーと比較して桁違いに大きいため、約1mmの深さまで残留応力の改善が可能である。更に、レーザの照射反力がないこと、ファイバケーブルを用いることで、狭隘部の施工への適応性も高い。

3. 工法適用の条件

本ガイドラインは、耐SCC性改善のために、部材表面に発生する引張残留応力を圧縮残留応力（0MPa以下）へ転換させるLP工法に適用する。本予防保全工法の適用条件として、確性試験またはこれに準じた確認試験が実施されている場合を除いて、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） 本工法を適用する範囲および期待する応力改善効果を設定する。適用後の効果確認方法については、適用後に直接的に確認することはできないため、事前に試験片を用いてLPを施工し、残留応力が改善されることを確認することにより工法の妥当性を確認する。（解説 4-1）
- （2） 施工条件に関する確認項目（解説 4-2）について実機施工前要領確認試験を実施し、施工後の応力改善効果を確認する。（施工条件の確立）
- （3） 適用箇所に対する検査方法を確立する。（解説 4-3）

なお、工法適用に当たり、4章に示す基本的な支配因子に対する要求値が変更される場合は、その都度、実機施工前要領確認試験を実施し、施工要領を再設定する必要がある。

4. 工法適用に対する要求事項

4. 1 工法適用に当たっての前提条件

LPは、水中の材料または水膜で覆われた材料にレーザを照射させる工法であることから、被施工体のレーザ照射部が水環境であることが前提条件となる。（解説 4-2）

4. 2 工法に対する要求事項

本予防保全工法を適用するに当たり、以下の要求事項が3章で確認された条件を満たしていることを確認すること。

- （1） 適用対象部位の材料、形状・寸法の確認（解説 1-2）
- （2） 基本因子における要求値の確認（解説 4-2、表解-1）
- （3） 適用箇所の施工対象面に割れなどの有害な欠陥がないことの確認（解説 4-3）

4. 3 使用装置に対する要求事項

3章にて実施する実機施工前要領確認試験を行う際に、装置仕様（要求事項）を明確にし、特に、施工面の引張残留応力を圧縮残留応力に転換するために、基本因子の内、パルスエネルギー、スポット径、および照射回数を制御できる装置であることを確認すること。

4. 4 オペレータに対する要求事項

本予防保全工法は、特別な技量を必要としないが、関連作業との確認を含め、オペレータは実機施工の一連の施工手順をモックアップなどでトレーニングを受ける必要がある。

4. 5 工法適用にあたっての注意事項

ピーニング対象箇所周辺の機器に対し、悪影響が懸念される場合には、施工前に影響を適切に評価するか、もしくは、施工後に健全性について確認すること。(解説 4-5)

5. 施工後の確認

本予防保全工法の施工後、上記 4.2 項の工法に対する要求事項を満足していることを施工記録などにより確認すること(施工中の確認(解説 4-3)を含む)。また、施工範囲において施工漏れのないことを目視検査にて確認すること。なお、4.2(3)の施工前検査を省略した場合は、施工後に施工面に割れなどの有害な欠陥がないことを確認すること。(解説 5-1)

6. 適用フロー

LPの適用フローを図1に示す。

施工面のうち、施工前または施工後の目視試験により割れ等の有害な欠陥がないことが確認された範囲は、各機器の点検評価ガイドラインに記載された点検周期の設定において、LPによるSCC予防保全効果が有効な範囲として扱うことができる。(解説 6-1)

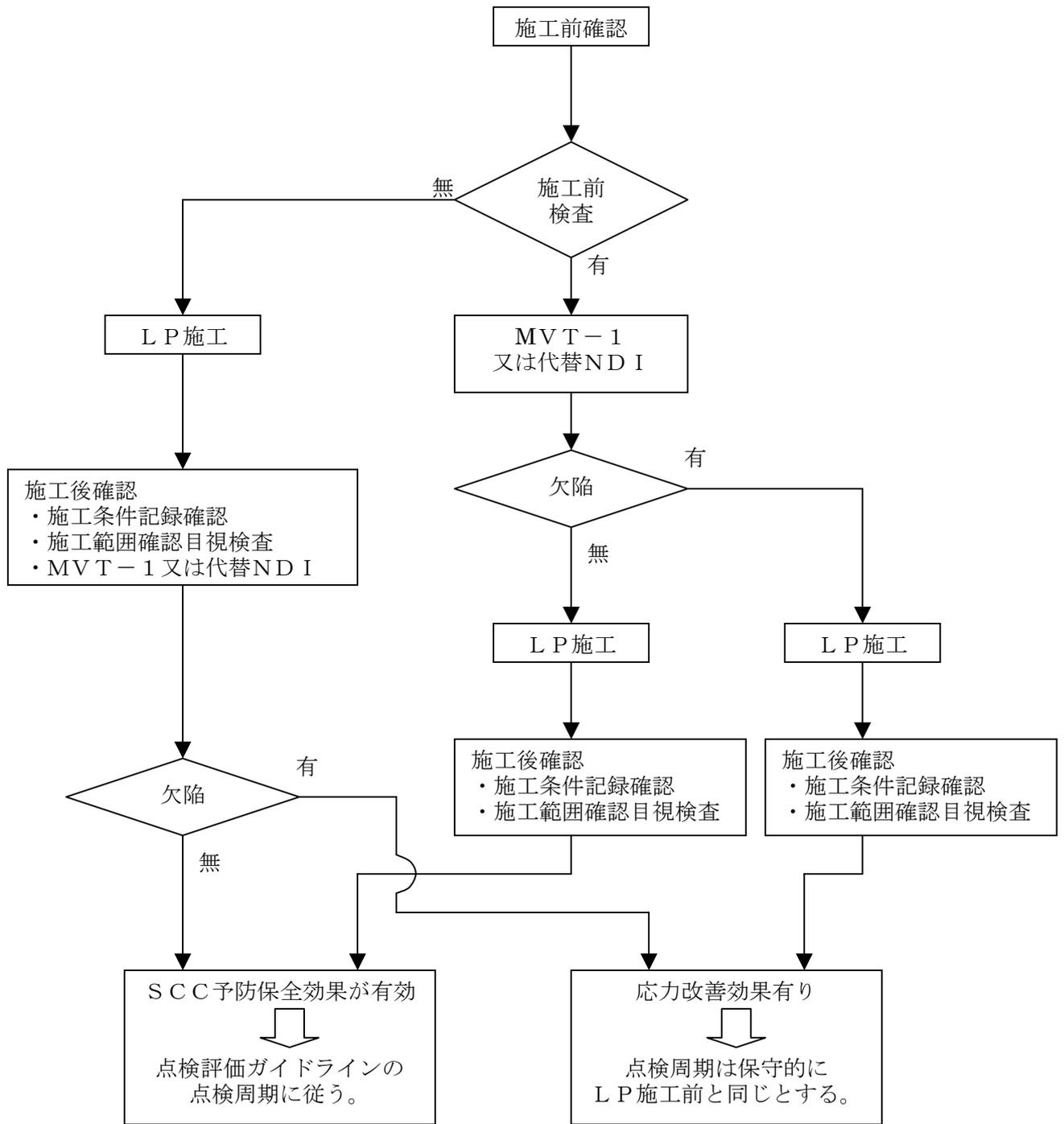


図1 LPの適用フロー

(解説 1-1) 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、予防保全工法に関して、機器の安全上要求される機能の維持に有効な施工管理項目と施工管理条件を示すことを目的とする。

(解説 1-2) 適用材料

軽水炉用機器に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）に対して、LPによって残留応力改善効果があることが確認されている。また、母材ばかりでなく、溶接熱影響部および溶接金属に対しても有効であり、以下に示す材料と加工方法他の組合せに対して、残留応力改善効果があることが試験によって確認されている。

部位 \ 材料	オーステナイト系 ステンレス鋼	高ニッケル合金（ニッケル クロム鉄合金）
一般溶接部	○	○
冷間加工部 （機械加工、研削加工）	○	○
放電加工（EDM）部	○	○
照射材	○（※）	—

○：試験により有効性が確認されているもの

※：高速中性子の照射による硬さ上昇を冷間加工で模擬した

(解説 2-1) LPの原理

LPは、水中の材料または水膜で覆われた材料にパルス発振のレーザを照射することによって表面に高圧のプラズマを発生させ、プラズマの衝撃圧力で施工対象の表面を押圧し、表面の残留応力状態を引張から圧縮に改善する技術である。

LPの原理を図 2-1(1)に示す。アブレーション閾値を超える照射出力密度（単位面積あたりのレーザ出力）のレーザパルス照射すると、材料の表層（通常は $1\mu\text{m}$ 以下）が瞬時にプラズマ化して表面に高圧の金属プラズマが発生する。水中または水膜がある状態では水の慣性でプラズマの膨張が妨げられるため、狭い空間にレーザのエネルギーが集中する。このため、空気中と比較してプラズマの圧力は $10\sim 100$ 倍にもなり、数 GPa に達する。この圧力によって衝撃波が発生し、材料中を伝播する。衝撃波による動的な応力が材料の降伏応力を超える領域で塑性変形が起き、未変形部の弾性拘束によって材料の表層に圧縮残留応力が形成される。

1 パルスで処理できる面積は 1mm^2 程度であるため、照射位置をずらしながら連続的にレーザパルスを被施工部に照射して必要な面積を施工する。また、被施工体の寸法や形状に応じて施工範囲を複数の領域（バッチ）に分割し、バッチ間に隙間が生じないようにオーバーラップを取りながらレーザパルスを照射する。LP施工手順の一例を図 2-1(2)に示す。

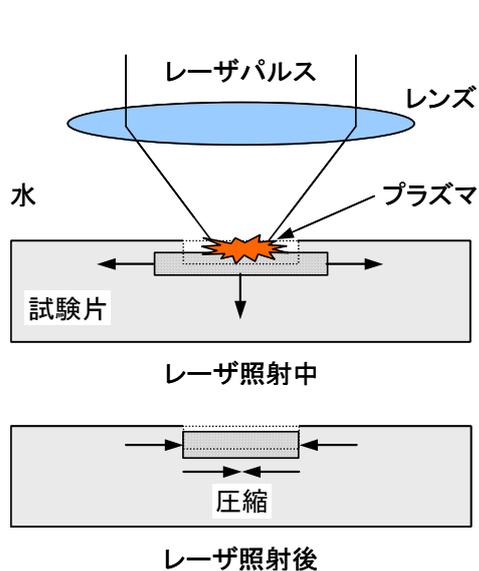


図 2-1(1) LPの原理

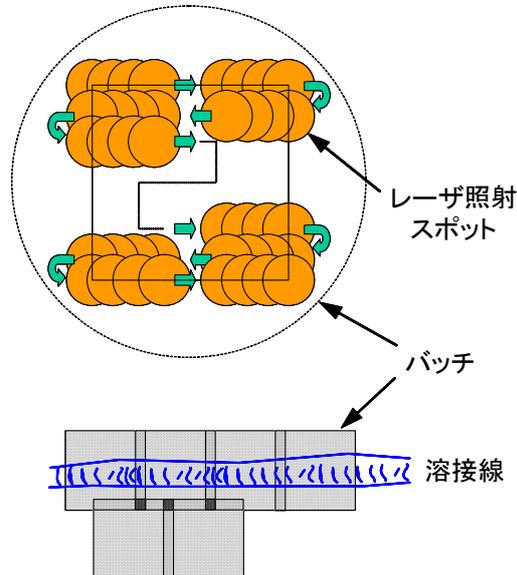


図 2-1(2) LP施工手順の一例

(解説 2-2) LP装置の基本構成

LPを軽水炉機器に適用する場合について、LP装置の基本構成例を図2-2に示す。

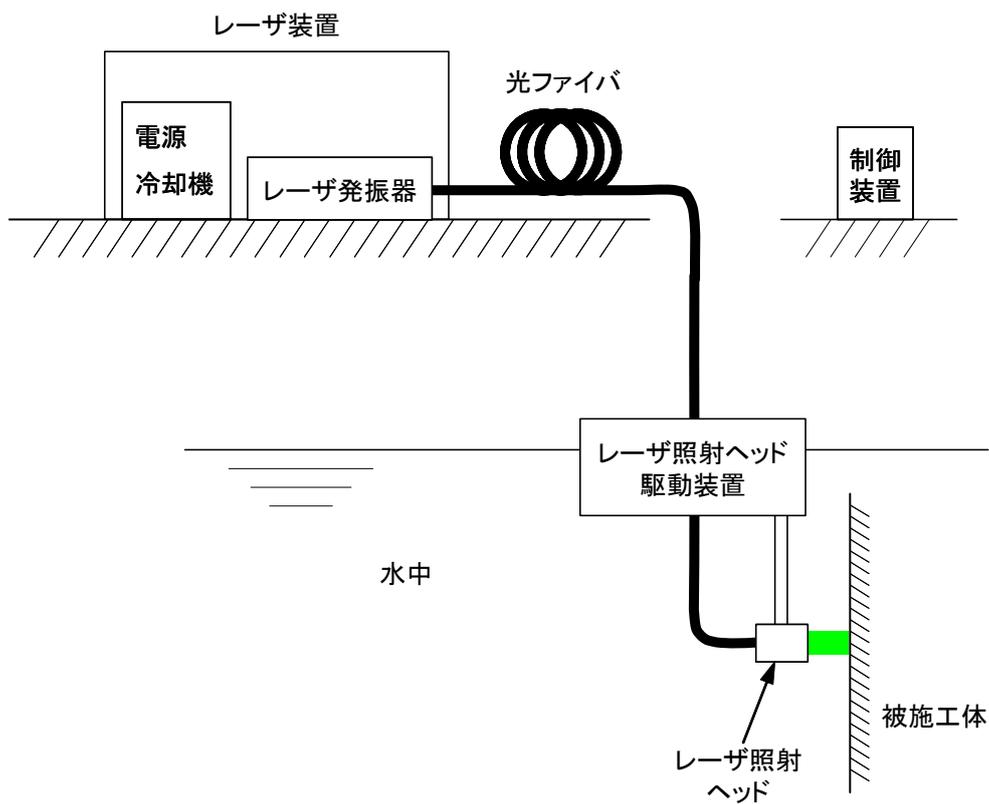


図 2-2 光ファイバ伝送式LP装置の基本構成

(解説 4-1) 期待する応力改善効果の設定

溶接試験材を用いた場合の施工要領確認試験において、ピーニング施工後に、溶接溶融線から少なくとも 7mm 以上の範囲に亘って、その表面及び表面から、オーステナイト系ステンレス鋼の場合に 100 μm 下、高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）の場合に 200 μm 下まで、それぞれ 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少なくとも 0 MPa 以下の圧縮残留応力に転換されていることを確認する必要がある。

上記の応力改善効果の設定は、耐 SCC 性の観点から、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、減肉量が少ないので、万一、深さ 100 μm 未満の微小き裂の存在を仮定しても、微小き裂を含めた表面からの圧縮残留応力の深さを 100 μm 以上とすれば、その SCC 進展が抑制されるという考え方を基にしている。

一方、高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）の場合には、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて、減肉量が若干増加する傾向（50 μm 程度）にあるので、余裕をみて表面からの圧縮残留応力の深さを 200 μm 以上とした。

(解説 4-2) 施工条件に関する確認項目

LP は、水中の材料または水膜で覆われた材料にパルス発振のレーザを照射することによって表面に高圧のプラズマを発生させ、その衝撃圧力で施工対象の表面を押圧し、表面の残留応力状態を引張から圧縮に改善させる工法である。LP の施工条件に関する前提条件と基本支配因子を表 4-1 に示す。各基本支配因子の中で、LP の施工対象を軽水炉用機器とした場合について検討を実施し、その中でピーニング効果を決定する基本支配因子のみを確認項目とした。

表 4-1 LP の前提条件および基本支配因子

No	基本支配因子	項目	確認項目
1	前提条件	1) 水雰囲気	—
2	プラズマ圧力に関する基本支配因子 $P \propto (E/\tau)^{0.5} \times (\rho V)^{0.5}$ ここで、 $E = G/A$ $A = \pi D^2/4$	1) パルスエネルギー：G	○
		2) スポット径：D	○
		3) パルス幅：τ	—
		4) 水の密度：ρ	—
		5) 水中の音速：V	—
3	残留応力改善に関する基本支配因子	1) スポット径：D	○
		2) パルスエネルギー：G	○
		3) 照射回数：N	○

a) 前提条件

LP は水中または水膜がある状態でレーザを照射する工法である。被施工体表面でレーザが照射される部分は水雰囲気、すなわち水で覆われている必要がある。

b) プラズマ圧力に関する基本支配因子

LPはパルス発振のレーザーの照射で発生する高圧プラズマの衝撃圧力を利用して材料表面を塑性変形させることにより、残留応力の改善を図る工法である。従って、プラズマの圧力が被施工材料の降伏応力を上回るようにレーザーの照射条件を制御する必要がある。

水で覆われた材料の表面にレーザーパルスを照射したときに発生するプラズマの圧力 (P) は、次式で表される (※)。

$$P = k (E/\tau)^{0.5} \times (\rho V)^{0.5} \quad \dots \dots \dots (4-1)$$

$$E = G/A$$

$$A = \pi D^2/4$$

ここで、

- k : 定数
- E : 照射エネルギー密度
- τ : レーザのパルス幅
- ρ : 水の密度
- V : 水中の音速
- G : パルスエネルギー
- A : スポット面積
- D : スポット径

であり、プラズマ圧力 (P) は、パルスエネルギー (E)、スポット径 (D)、パルス幅 (τ)、水の密度 (ρ)、水中の音速 (V) によって決定される。

(※) 出典 : (1)R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux and J. Virmont, "Physical Study of Laser- Produced Plasma in Confined Geometry," J. Appl. Phys., **68** (1990) 775.

(2)Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata, "Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation," Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, **121**, (1997) 432.

①パルスエネルギー : G

スポット径とともに、パルスエネルギーはレーザーの照射エネルギー密度およびプラズマの圧力を支配するパラメータであるので、確認項目である。

パルスエネルギーは、使用するレーザー装置の波長と環境に応じ、減衰補正を行う必要がある。レーザーが水中を伝播するときの減衰係数を図 4-1(1)に示す。減衰係数は、レーザーの強度が $1/e$ となる距離の逆数で定義される。可視領域では水による減衰は小さく、波長 0.45 ~ 0.6 μm の領域では減衰係数は 0.1/m 以下であるため、水中透過距離が 100mm あったとしても減衰は 1%以下である。特に YAG レーザの第 2 高調波は波長が 0.53 μm であり、最も吸収が少ない波長帯となるため、300mm の水中透過距離で約 1%の減衰となる。従って、YAG レーザの第 2 高調波を使用する場合には、実用上水の吸収補正は必要でない。

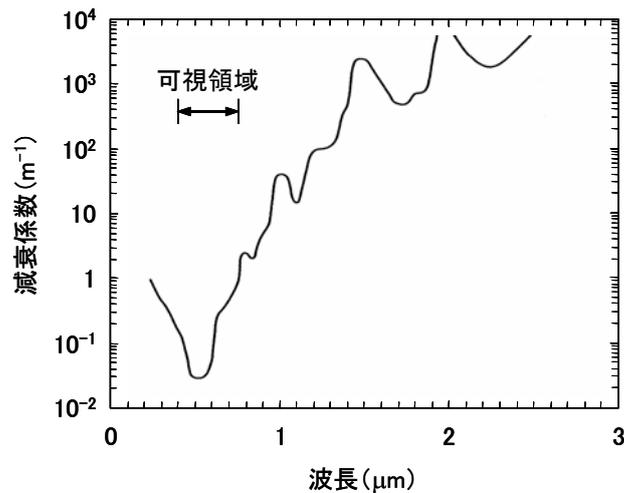


図 4-1(1) 水によるレーザーの減衰

出典： 有賀規著 空間伝送光学 水曜社（2000年9月）83頁.

②スポット径：D

パルスエネルギーとともに、スポット径はレーザーの照射エネルギー密度およびプラズマの圧力を支配するパラメータであり、確認項目である。なお、照射角度が90度（垂直入射）以外ではレーザーの照射形状は楕円となるが、その場合には照射面積が等しい真円の直径をスポット径と定義する。

レーザーの照射角度を90度から変化させてLP施工を行ったときの材料表面の残留応力を図4-1(2)に示す。照射角度を小さくするとレーザーの照射形状は楕円となるが、同一面積の真円でLP施工した場合とほぼ同等の表面残留応力値が得られている。

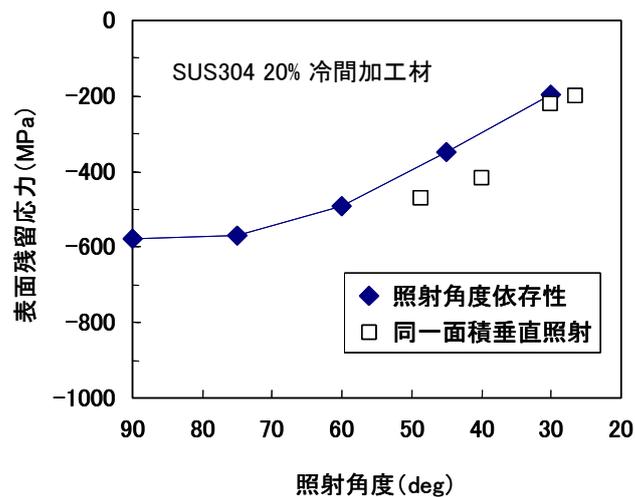


図 4-1(2) レーザーの照射角度と表面残留応力の関係

出典： 依田正樹、他、レーザー学会学術講演会第18回年次大会講演予稿集（1998年1月）121頁.

③パルス幅： τ

式(4-1)に示すとおり、パルス幅はプラズマの圧力を支配するパラメータであり、パルス幅が短いほどプラズマの圧力は高くなる。パルス幅はレーザ装置（共振器）の構成とレーザ媒質の励起強度で決定されるため、レーザ装置を選定するとほぼ一定のパルス幅となる。また、図4-1(3)に示すとおり、パルス幅6~10nsでLPによる残留応力改善効果に差がないことから、レーザ装置のパルス幅は10ns以下であれば良い。従って、パルス幅は確認項目とならない。

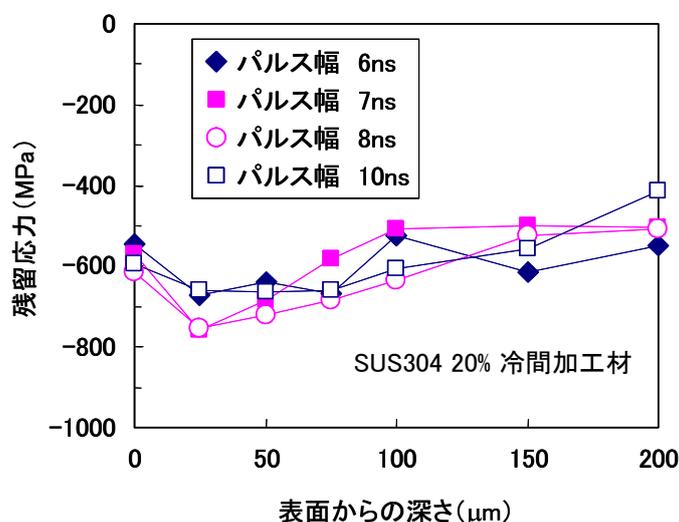


図 4-1(3) 残留応力分布に及ぼすレーザパルス幅の効果

④水の密度： ρ 、および水中の音速： V

水の密度および水中の音速は、音響インピーダンス (ρV) 並びにプラズマの圧力を支配するパラメータである。

製造・建設時、および定期検査中にLPを適用する場合の水温は50℃以下と考えられるため、水の密度および水中の音速はほぼ一定であり、確認項目とならない。

c) 残留応力改善に関する基本支配因子

(1) パルスエネルギー： G

前項b)に記載のとおり、プラズマの圧力は、パルスエネルギーとスポット径に依存する。従って、パルスエネルギーは1パルスごとの衝撃圧力、すなわち1パルスごとの被施工材料表面の塑性変形量を支配するため、確認項目となる。

(2) スポット径 : D

前項 b) に記載のとおり、プラズマの圧力は、スポット径とパルスエネルギーに依存する。従って、スポット径は1パルスごとの衝撃圧力、すなわち1パルスごとの被施工材料表面の塑性変形量を支配するため、確認項目となる。

また、1箇所あたりに照射されるレーザパルス数(カバレッジ)は、スポット径と照射回数に依存するため、積算の塑性変形量を支配する。

(3) 照射回数 : N

1箇所あたりに照射されるレーザパルス数(カバレッジ)は、照射回数とスポット径に依存するため、照射回数は積算の塑性変形量を支配する。従って、照射回数は確認項目となる。

LPでは、十分な深さまで残留応力の改善効果を得るため、1箇所あたりに複数のレーザパルスを照射する。従って、ショットピーニングと同様に1箇所あたりに照射されるレーザパルス数をカバレッジ(C)と定義すると、 $C > 1$ の条件で施工を行っている。

カバレッジ(C)と照射回数(単位面積あたりの照射パルス数)の関係は以下となる。

$$C = (\pi D^2/4)N$$

ここで、

D : スポット径

N : 照射回数

である。

1箇所に照射するレーザのパルス数(カバレッジ)をパラメータとして、残留応力の深さ分布を測定した例を図4-1(4)に示す。照射するレーザパルス数を増やすと、残留応力の改善効果はより深くまで及ぶことが示されている。

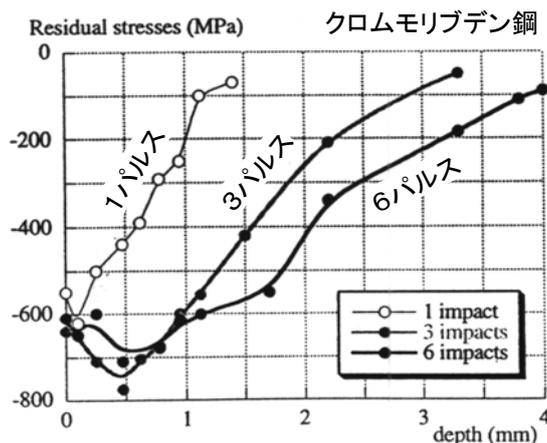


図 4-1(4) 残留応力分布に及ぼす照射パルス数の影響

出典 : R. Fabbro, et al., J. Laser Applications, 10 (1998) 265.

図 4-1(4)の例はクロムモリブデン鋼に対するLP効果を示したものであるが、同様の目的

で SUS304 について実施した有限要素法によるシミュレーションの結果を図 4-1(5)に示す。図 4-1(4)の実測結果と同様に、照射するレーザーパルス数を増やすと残留応力の改善効果がより深くまで及ぶことが解析でも示されている。なお、この場合、2パルスまたは3パルスの照射で実験の結果を良く再現する残留応力分布が得られている。

以上のように、残留応力の改善効果が及ぶ深さはカバレッジすなわち照射回数（単位面積あたりに照射するレーザーのパルス数）とスポット径に依存する。このため、照射回数についても適切な範囲を定め、LP施工ごとに確認しておく必要がある。

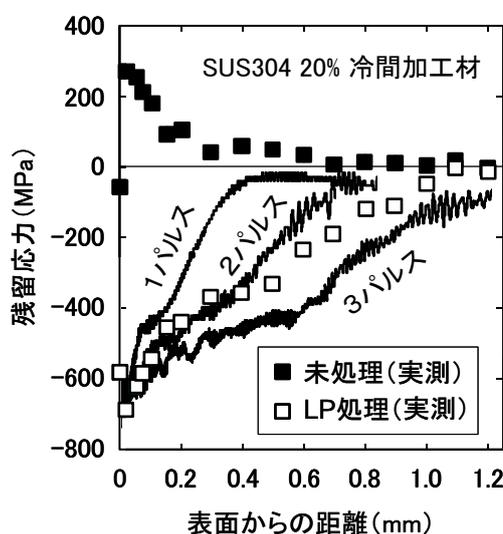


図 4-1(5) 残留応力分布に及ぼす照射パルス数の影響 (SUS304)
(実測とシミュレーションの比較)

出典： 佐野雄二，他，日本原子力学会誌, 42 (2000) 567.

最後に、プラズマの衝撃圧力と1パルスごとの塑性変形量を決定するレーザーの「照射エネルギー密度」、並びに積算の塑性変形量を決定する「カバレッジ」の両者を一定とし、確認項目となる「パルスエネルギー」、「スポット径」、「照射回数」を変化させてLP施工を行った。施工条件を表 4-2 に、残留応力の測定結果を図 4-1(6)に示す。

「パルスエネルギー」、「スポット径」、「照射回数」の各々の値は異なっても、それらから決まる「照射エネルギー密度」と「カバレッジ」を一定とすることにより、ほぼ同等の残留応力改善効果が得られることを確認した。

表 4-2 施工条件（照射エネルギー密度、カバレッジ：一定）

施工条件	1	2	2
パルスエネルギー：G (mJ)	50	100	200
スポット径：D (mm)	0.4	0.57	0.8
照射回数：N (パルス/mm ²)	144	72	36
パルスあたりの照射エネルギー密度：E (MJ/mm ²)	0.4		
カバレッジ：C (-)	18		
累積照射エネルギー密度 (MJ/mm ²)：G・N	7.2		

$$E = G/(\pi D^2/4), \quad C = (\pi D^2/4)N$$

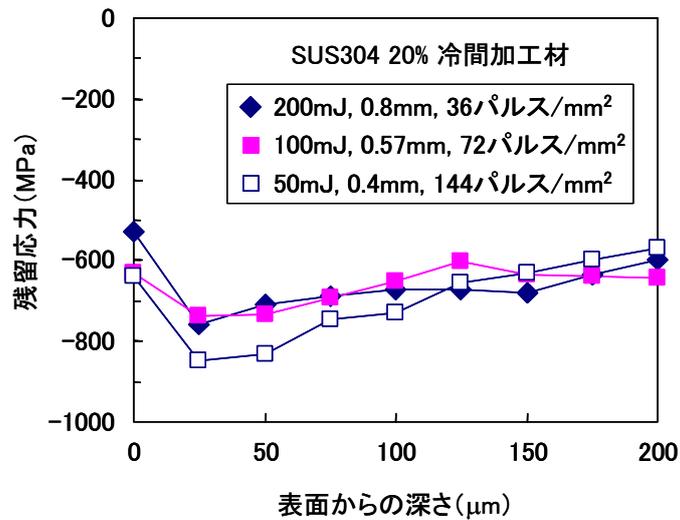


図 4-1(6) LP 効果の比較（照射エネルギー密度、カバレッジ：一定）

d) 基本支配因子の確認項目

a) ～ c) の検討により、LP 施工においては、パルスエネルギー、スポット径、照射回数がピーニング効果を決定するパラメータとなることから、以下の基本支配因子を確認項目とした。

(0) 前提条件

水雰囲気での施工とし、被施工体表面のレーザ照射部が水でおおわれていることとする。また、レーザ装置のパルス幅は 10ns 以下とする。

(1) パルスエネルギー

スポット径とともに、パルスエネルギーはレーザの照射出力密度を決定し、プラズマ圧力を支配するパラメータであるので、確認項目とした。

(2) スポット径

パルスエネルギーとともに、スポット径はレーザの照射出力密度を決定し、プラズマ圧力を支配するパラメータであるので、確認項目とした。

(3) 照射回数

1箇所あたりに照射されるレーザのパルス数（カバレッジ）を決定し、塑性変形の蓄積量並びに残留応力の改善深さに影響するため、確認項目とした。

なお、表解-1 の条件であれば、オーステナイト系ステンレス鋼、高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）、および両者の溶接金属に対して 4.2 項に示す要求事項を満足すること、および材料に悪影響を与えないことが、(財) 発電設備技術検査協会にて行われた確性試験において確認されている。

表解-1 確性試験において確認されている条件

	パルスエネルギー (mJ)	スポット径 (mm)	照射回数 (パルス/mm ²)
オーステナイト系 ステンレス鋼 (※)	200～250	0.6～1.2	36～54
オーステナイト系 ステンレス鋼 (溶接金属を含む)	60～100	0.4～0.9	50～135
	60～100	0.4～1.0	70～135
高ニッケル合金 (ニッケルクロム鉄合金) (溶接金属を含む)	40～100	0.4～1.0	70～135
	60～100	0.4～1.0	18～135
	60～100	0.4～1.2	70～135
レーザの種類、波長	YAG レーザ、0.53μm		
施工回数の制限	最大重ね合せ施工回数： 16 回		

※：本条件では、最大重ね合せ施工回数は 8 回まで確認されている（他は 16 回）

(解説 4-3) 施工面の検査

点検周期の設定において、SCC発生に対する予防保全効果が有効な範囲とするためには、施工前目視試験（MVT-1）または施工後目視試験（MVT-1）により割れ等の有害な欠陥が認められないことを確認しておく必要がある。目視試験が実施困難な部位に対しては、他の非破壊検査手法によって代替することができる。

なお、施工後に目視試験をする場合、LP施工による割れ等に対する視認性の低下がないことを確認している。（付録A）

(解説 4-4) 施工中の確認要求

LP施工中はバグ毎に要求事項であるパルスエネルギー、スポット径、および照射回数が適正な範囲にあることを確認する。

(解説 4-5) 施工による周辺部への影響

レーザピーニングの照射は直径1mm程度の小さなスポット径として管理して行い、照射部以外の周辺機器へ影響が及ぶことは無い。また、施工対象構造物へ与えるパワーは軽微なものであり、有意な振動が発生することは無い。多数の施工実績や、それ以降の炉内点検等でレーザピーニング施工に起因する周辺機器の異常が認められた例は無い。

(解説 5-1) 施工後の確認要求

LP施工後に、施工前および施工中の確認事項を満足していることを記録にて確認する。また、施工範囲に対して、施工漏れがないことを目視にて確認する。

(解説 6-1) 点検周期設定における施工範囲の扱い

施工前または施工後の目視試験において、割れ等の有害な欠陥が認められなかった範囲は、LPによる表面の圧縮応力付与によりSCC感受性が低下するため、点検周期の設定において、予防保全効果が有効な範囲として扱うことができる。具体的な扱いについては、各機器の点検評価ガイドラインに従う。

施工前または施工後の目視試験において割れが認められた範囲についても、表面に圧縮応力が付与されたことにより、SCCき裂進展を抑制する効果があるものと考えられるが、き裂進展評価において、保守的にLP施工前と同等に扱うものとする。

付録A LP施工後の視認性確認試験

1. まえがき

LP施工後に目視試験を実施する場合を考慮して、LP施工によりSCCなどのき裂に対する視認性が低下しないことを確認する。

2. 試験片

試験片材質および形状は以下の通りである。

材質：SUS304 鋭敏化処理材（620℃×24 時間）

形状：19×50×3t（mm）

3. 試験手順

視認性確認試験の手順を図 A-1 に示す。

(1) 試験片に専用治具を用いて曲げ加工を施し、表面に 0.5%の引張歪を付与し、288℃、溶存酸素濃度 8ppm、導電率 1 μ S/cm の高温水中に 500 時間浸漬して試験片表面に微小き裂を形成した。さらに、試験片を曲げ治具からはずした後、曲率の小さい曲げ治具に再度固定してき裂を開口させ、最大で約 30 μ m 程度のき裂を複数形成した。

(2) 試験片長手方向中央部より半分の領域にレーザーピーニング施工を行った。施工条件は以下の通りである。

パルスエネルギー：60mJ

スポット径：0.7mm

照射回数：70 パルス/mm²

(3) 施工部、未施工部の外観観察によりき裂の視認性を目視により確認した。

(4) 炉内環境での検査を想定し、カメラを用いた水中でのき裂の視認性確認を行った。なお、観察は同一環境下で 0.025mm幅のワイヤの識別が可能であることを事前に確認してから行った。

4. 試験結果

レーザーピーニング施工後のき裂視認性確認試験結果を図 A-2 に示す。レーザーピーニング施工により、き裂の視認性が低下することがないことを確認した。

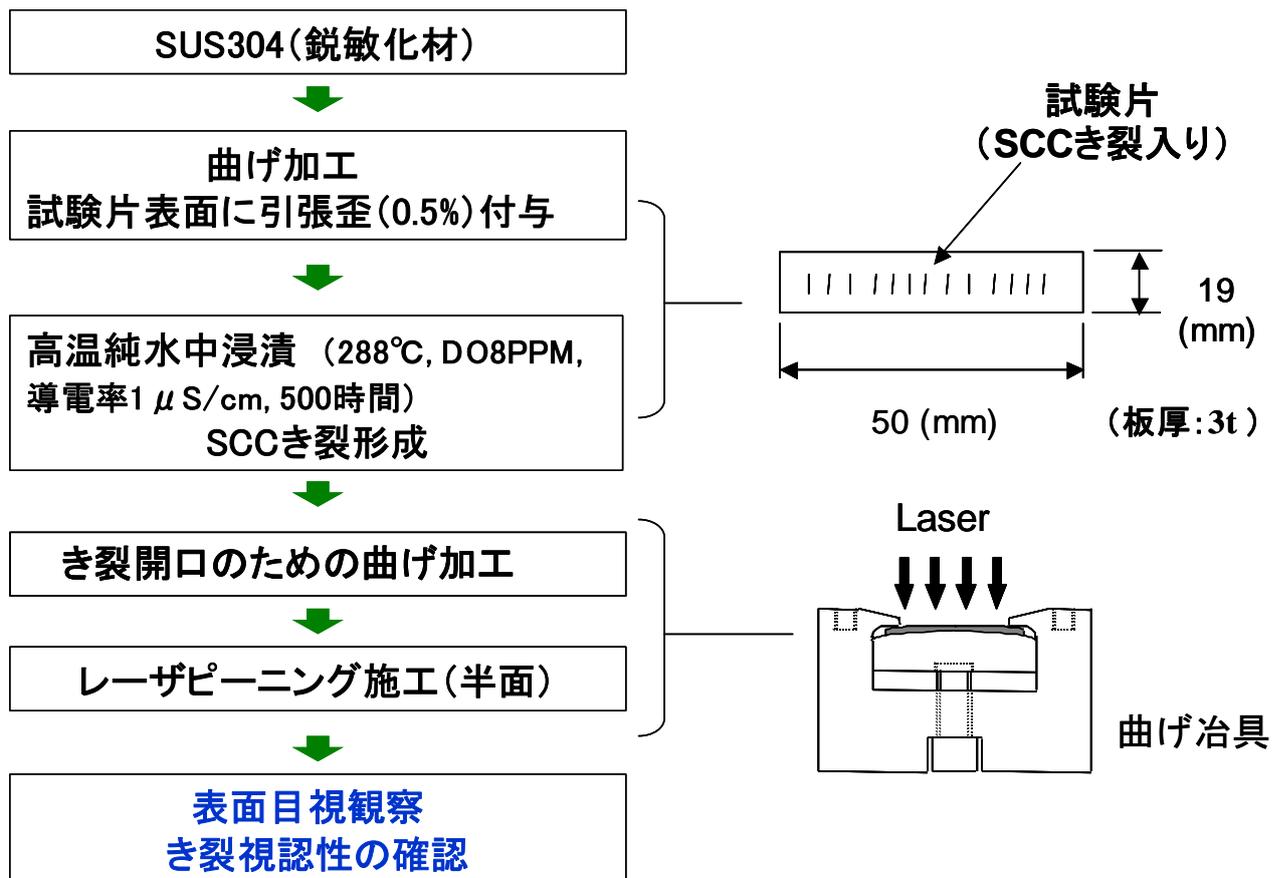


図 A-1 視認性確認試験手順

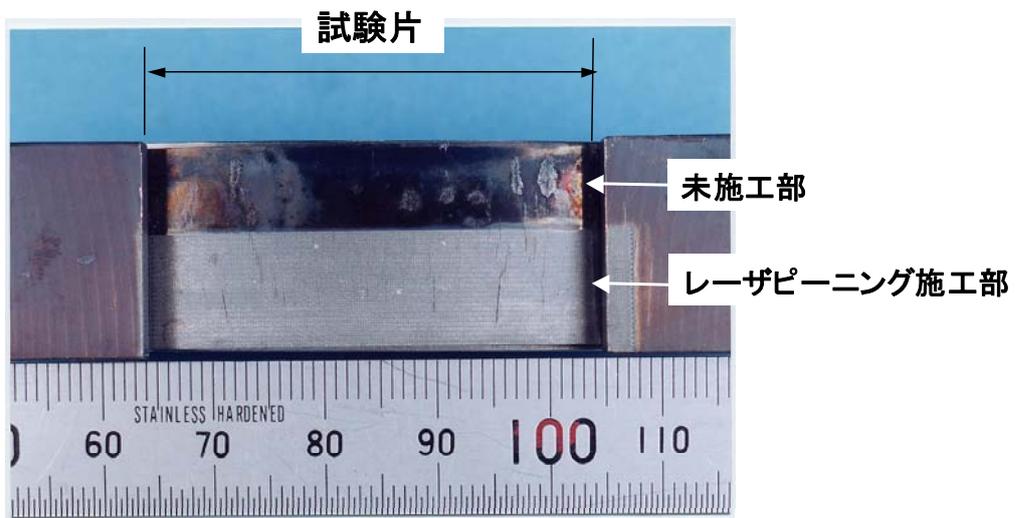


図 A-2 き裂視認性確認試験結果 (SUS304)

予防保全工法ガイドライン

[超音波ショットピーニング工法]

1. 目的及び適用

本ガイドラインは、原子力発電所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超音波ショットピーニング（USP：Ultrasonic Shot Peening）の適用要領についてまとめたものである。（解説 1-1）

適用対象としては、原子力発電所用機器の高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）およびオーステナイト系ステンレスを使用している内径 600mm 以上の管または板とする。また、適用時期としては、製造・建設時を含む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。（解説 1-2）

2. 工法の概要

本予防保全工法は、SCC によるき裂の発生を未然に防止するために、超音波振動を駆動源としたショット材を対象部位に衝突させ、その衝撃圧を利用して、材料表面に塑性変形を起こさせ、構造体の表面を圧縮残留応力とすることで、SCC の発生の抑制効果が期待できる工法である。（解説 2-1）

3. 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）期待する効果の設定及びその効果が得られるような施工要領確認試験の実施（解説 3-1）
- （2）適用箇所の表面近傍状態の確認方法の確立（解説 3-2）
- （3）適用範囲の設定（解説 3-3）
- （4）施工後の効果確認方法の確立（解説 3-4）

尚、工法適用に当たり、4. 項に示す工法に対して期待する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。（解説 3-5）（解説 3-6）

4. 工法適用に対する要求事項

4.1 工法適用にあたっての前提条件

本予防保全工法を適用するに当たり、前提条件は以下とする。（解説 4-1）

- （1）対象は、原子力発電所用機器の内径 600mm 以上の管または板とする。
- （2）環境は、適用対象部位及び周辺部位が気中環境であること。

4.2 工法に対する要求事項

本予防保全工法を適用するに当たり、以下の要求事項を確認すること。

- (1) 適用箇所の表面近傍に割れ等の有害な欠陥がないことの確認（解説 4-2）
- (2) 適用対象部位の材料、形状、寸法の確認（解説 4-3）
- (3) 工法における基本支配因子の確認（解説 4-4）
- (4) 基本支配因子における管理項目の要求値の確認（解説 4-5）

4.3 使用装置に対する要求事項

3. (1) にて実施する施工要領確認試験を実施する際に、装置仕様（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。

なお、施工要領確認試験で明確にした装置仕様以外の装置を使用する必要がある場合は、その差異を明確にし、適切な技術的評価を実施すること。（解説 4-6）

4.4 オペレータに対する要求事項

本予防保全工法に関するオペレータの技量としては、装置の施工対象部位への設定、ピーニングヘッドの走行・位置の設定及び操作盤の操作・運転などが考えられる。したがって、オペレータは技量の確認及び関連作業との確認も含め、実機施工の一連の施工手順をモックアップなどで訓練を受ける必要がある。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実施すること。

4.5 工法適用にあたっての注意事項

過度のピーニングによる材料への悪影響が懸念される場合には、施工要領確認試験結果に基づき施工の重ね合わせや長時間施工等に対する投射時間の制限を設けること。

5. 施工後の確認

本予防保全工法の施工後、上記 4.2(4) の事項が規定した管理値の範囲で施工されたことを確認すること。また、施工表面に異常がないことを目視試験（VT-3）により確認すること。（解説 5-1）

なお、期待する効果が得られていることについては、管理項目が規定した管理値の範囲で施工されたことを確認することをもって確認する。（解説 3-4）

(解説 1-1)

原子力発電用設備では、近年海外で損傷事例が散見されてきたことから、機器に適した合理的な点検要領が検討されている。一方で、さらに、点検の合理化を図るために、点検により損傷を検知する前に、予防保全対策を適用することについても検討されてきている。

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、USP技術の適用要領についてまとめたものである。

USPは、空気圧または水圧をショット材の駆動源としている通常のショットピーニングによる施工ではなく、超音波振動を駆動源としている。

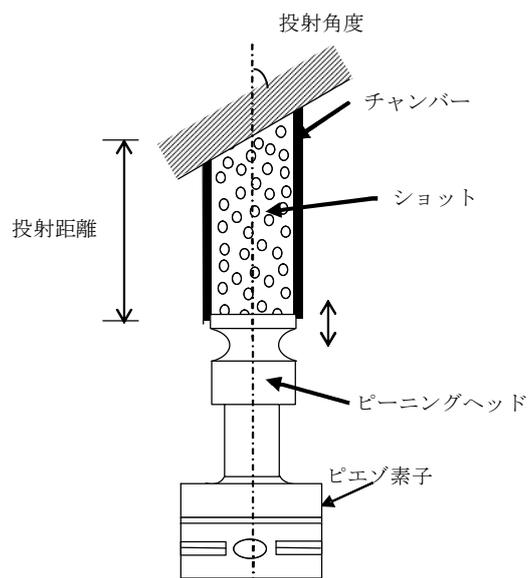
一例としては、加圧水型原子力プラント（PWR）の一次系環境下で600合金（NCF600相当材）が使用されている部位は、一次系環境下での応力腐食割れ（PWSCC：Primary Water Stress Corrosion Cracking）の懸念があり、予防保全策としてウォータージェットピーニング（WJP：Water Jet Peening）をはじめとした残留応力低減技術を適用中であるが、水を内包した状態で装置の寄付きが困難な場合に本工法の適用が望ましい。

(解説 1-2)

本ガイドラインにおけるUSPは、製造・建設時を含む商業運転開始前及び商業運転開始後の供用期間中に適用するための技術である。

(解説 2-1) USPの原理

USPは、 piezo素子の超音波振動により、ショットをチャンバー内で対象物とピーニングヘッド間で往復運動させることで、ショットピーニングを行なう工法である。応力改善の原理は従来のショットピーニングと同様で、ショットが金属表面に衝突した時に、ショットの運動エネルギーにより、金属表面を押し延ばすような塑性変形を与え、板厚内の拘束により表面近傍に圧縮応力を付与する手法である。



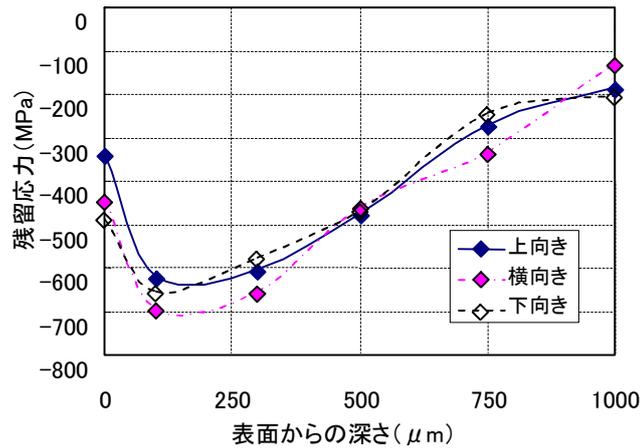
解説図2-1 US Pの模式図

(解説 3-1) 期待する効果及びその効果を得るための施工要領確認試験

US P適用の目的は、応力腐食割れに対する予防保全工法として、表面の応力状態を圧縮応力に改善することである。

目標とする残留応力改善深さは、耐SCC性の観点から、微小き裂の存在を仮定しても、その微小き裂からのSCC進展が抑制されるという考え方を基にして設定する必要がある。例えば、解説図 3-1 に示すように $1,000\ \mu\text{m}$ (1.0mm) 深さの範囲までを圧縮応力に転換できる場合、 $1,000\ \mu\text{m}$ (1.0mm) 程度深さのき裂があってもUS Pによる効果は期待できる。

このような期待する効果を得るためのUS Pの施工条件を設定するために、施工要領確認試験を実施する。試験は、期待する効果に影響を及ぼす施工条件である基本支配因子に対する要求値を設定した上で、期待する効果が得られるかどうかの確認を、実機条件を模擬したモックアップ供試体などを使用して実施する。



解説図 3-1 期待する効果例

(解説 3-2) 表面状態の確認方法

USPを適用するに当たり、施工前の表面状態を確認するための目視検査、非破壊検査などの検査手法を選定しておく必要がある。また、施工部周辺の設備への影響を適切に評価の上施工可否を判断する。

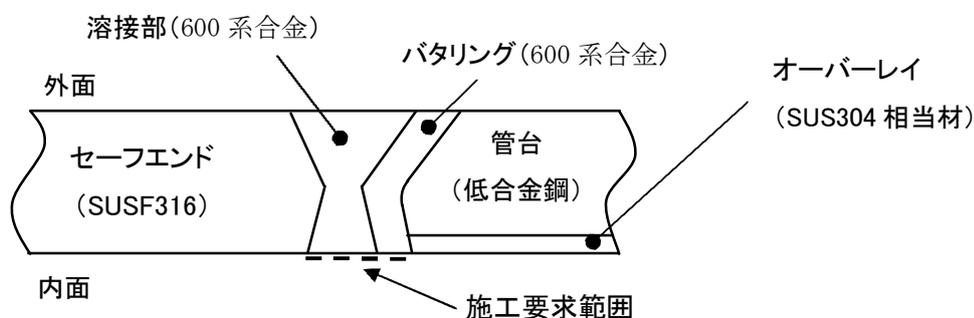
(解説 3-3) 適用範囲の設定

原子力発電所用機器に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼と炭素鋼または低合金鋼(*1)との継手で高ニッケル合金(ニッケルクロム鉄合金)(600系合金)による突合せ溶接部に対して、USPによって残留応力改善効果があることが確認されている。また、母材ばかりでなく、溶接熱影響部及び溶接金属に対しても有効であることが試験によって確認されている。

(*1) 施工面にはオーステナイト系ステンレス鋼がクラッドされた炭素鋼又は低合金鋼

施工対象の例としてPWRの蒸気発生器・原子炉容器出入口管台を解説図 3-2 に示す。

出入口管台セーフエンド溶接部



解説図 3-2 蒸気発生器・原子炉容器出入口管台に対するUSP適用範囲

(解説 3-4) 効果確認方法

適用するUSPが、期待する効果が得られる工法であったことを、適用後に直接的に確認することは不可能である。そのため、施工管理項目が、施工要領確認試験の際に設定された施工条件と著しく異なっていないことを継続的に管理することによって、効果の有無を確認する。

(解説 3-5) 基本支配因子

本ガイドラインにおける基本支配因子の定義は以下とする。

- ・ 基本支配因子とは、工法の活用原理に基づき工法の有効性を支配する支配方程式中の変数または独立変数であり、工法の有効性を確保する上でコントロールすることが必要不可欠で、かつモックアップ試験等によりその有効範囲が確認された施工因子のことを言う。

(解説 3-6) 施工要領確認試験の再試験

施工要領確認試験の実施により設定された施工条件のうち、基本支配因子に対する要求事項を変更する場合は、工法適用により期待する効果を再設定し、その効果を得るための施工条件を、施工要領確認試験を実施することにより再設定する必要がある。

(解説 4-1) U S P 適用に当たっての前提条件

U S P を適用するに当たっての前提条件として、対象は原子力発電所用機器でオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金(ニッケルクロム鉄合金)を使用している部位(溶接部及び熱影響部を含む)を選定する。また、適用環境としては、気中環境とする。

(解説 4-2) 施工前確認

U S P を適用するに当たり、適用箇所表面状態の確認として、表面近傍に割れ等の有害な欠陥がないことを適用前に確認する必要がある。確認方法としては、目視検査(MVT-1)、非破壊検査(ECT など)とする。

(解説 4-3) 適用対象部位の材料、形状、寸法

適用対象部位は、プラントにより形状寸法・材料が異なっていたり、また、寸法も異なっていることから、U S P 装置のインタフェースの観点で、適用プラント毎に適用対象部位の形状寸法を確認しておく必要がある。

(解説 4-4) U S P における基本支配因子

U S P は、超音波振動により与えられたショット材の運動エネルギーによる高い衝撃圧力で機器表面を押圧することにより引張残留応力を低減させるか、または圧縮残留応力へと転換させる工法である。

U S P の施工条件に関する前提条件と基本支配因子を解説表4-1に示す。各基本支配因子の中で、U S P の施工対象を加圧水型原子力発電所(PWR)用機器とした場合について検討を実施し、その中でピーニング効果を決定する基本支配因子のみを確認項目とした。

残留応力改善効果と材料表面の硬化はショット材の運動エネルギーの強さに依存するため、残留応力改善が得られ、かつ、材料表面の硬化が生じない施工条件を設定する。

解説表 4-1 U S P の前提条件及び基本支配因子

No	基本支配因子	管理項目	確認項目
1	前提条件	1) ショット材：固体	
		2) 周囲流体：気体（空気）	
2	ショット加速に関する 基本支配因子 $v = 2 \pi f \times (0.5 \times \lambda) \times \cos(2 \pi f \times t)$	1) 振幅： λ	○
		2) 周波数： f	○
		3) 速度： v	—
		4) ショット材質	○
		5) ショット形状	○
		6) 投入量（充填率） ^(*1)	○
3	残留応力改善に関する 基本支配因子	1) 投射距離	○
		2) 投射時間 ^(*2)	○
		3) 投射角度	○
		4) 投射姿勢	(○)

(*1) ピーニングヘッド面積に対するショットの投影断面積の比で定義

(*2) 施工面への実投射時間の累積時間

(1) 材質

施工対象は、原子力発電所用機器に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼（P-8）及び高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）（P-43）とし、母材だけでなく溶接部及び溶接による熱影響部を含める。また、施工面にオーステナイト系ステンレス鋼がクラッドされた炭素鋼（P-1）又は低合金鋼（P-3）も施工対象に含める。

(2) 施工対象

施工対象は、ピーニングヘッドを設置し、稼動できるだけの十分な空間を有する管および板とする。

(3) 施工条件

施工条件については、維持規格での考え方を参考にして以下のように規定し、試験にて確認することとする。

a. ピーニングヘッドの周波数と振幅

U S P はショットの運動エネルギーを金属に与える施工法であるため、ショットの投射速度の管理が重要である。投射速度はピーニングヘッドの周波数と振幅により以下のように定義される。

ピーニングヘッドは正弦波で振動しているとする、ピーニングヘッドの変位 x は（1）式で示される。

$$x = 0.5 \times \lambda \times \sin(2 \pi f \times t) \quad \text{---(1)}$$

ここで、 λ : 両振幅、 f : 周波数、 t : 時間

ピーニングヘッドの速度 v は、(1) 式を時間で微分して、(2) 式のようになる。

$$v = 2 \pi f \times (0.5 \times \lambda) \times \cos(2 \pi f \times t) \quad \text{--(2)}$$

ショットの質量に比べて、ピーニングヘッドの質量は十分に大きくすれば、ショットはピーニングヘッドの移動速度と同等の速度で投射される。故に、ショットの投射速度はピーニングヘッドの周波数 f と振幅 λ で管理することができる。

b. ショット材質と形状

USPではショットを金属表面に衝突させて、運動エネルギーを金属に与える施工法であるため、ショットの材質と形状を管理する必要がある。ショットの材質については、施工対象金属と同等以上の耐食性を有し、かつ強度が高い材料を選択する。運動エネルギー（応力改善効果）に影響を与えるため、ショット形状は球形（ベアリングボール相当）とし、ショットの外径については一定として管理する。

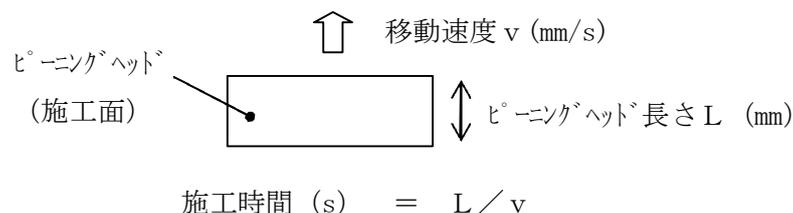
c. ショット投入量（充填率）

ショットの投入量は、対象面に対するショットの衝突頻度（個数）に寄与するため、上限と下限を規定する。なお、ショットの投入量は、ピーニングヘッドの面積（＝被施工部の面積）に対する総ショットの投影面積の比率（充填率と称す）で管理する。

d. 施工時間

施工時間は、ショットが単位面積あたりに衝突する個数に寄与し、応力改善効果に影響を与えるため、上限と下限を規定する。施工時間は、ピーニングヘッド（施工面）の移動方向の長さ(mm)と移動速度(mm/s)の商で定義する。

また、材料に対する悪影響を与えないことを確認するため、長時間施工及び止め打ち時間に対して、上限を規定する。



e. 投射距離

投射距離（ピーニングヘッドと対象金属の距離）が長くなると、金属に与えることのできる運動エネルギーが減少し、応力改善効果に影響を与えるため、上限を規定する。また、材料に悪影響を与えないことを確認するため、下限についても規定する。

f. 投射角度

投射角度（ピーニングヘッドと対象金属の角度）が小さくなると、金属に与えることのできるエネルギーが減少し、残留応力低減効果に影響を与えるため、下限を規定する。なお、ここではピーニングヘッドと対象金属が直角の時の噴射角度を90°と定義する。

g. 投射姿勢

施工対象は管内面であり、全姿勢での施工となる。ただし、投射速度が高速であり、かつ投射距離が短い場合には、重力の影響は無視することができると考えられ、管理項目とならない。

（解説 4-5）施工管理項目

USPの基本支配因子に対する要求値を満足させるために、管理施工項目を設定する必要がある。これは、例えば、基本支配因子である投射速度に対して、投射速度は、ピーニングヘッドの振幅や周波数などによって決められるため、管理する項目としては、投射速度ではなく、ピーニングヘッドの振幅や周波数になってくるためである。解説表 4-2 に施工管理項目の例を示す。

解説表 4-2 USPにおける施工管理項目の例

施工管理項目		試験範囲
振幅		50 μm
周波数		20 kHz
ショット	材質	718 合金
	形状	球形 φ4mm
	投入量 (充填率)	約 25% (*2)
投射距離		20 mm
投射時間 (*1)		150~600 s
投射角度		垂直 (90°)
投射姿勢		(上向き/横向き/下向き)

(*1) 施工面への実投射時間の累積時間

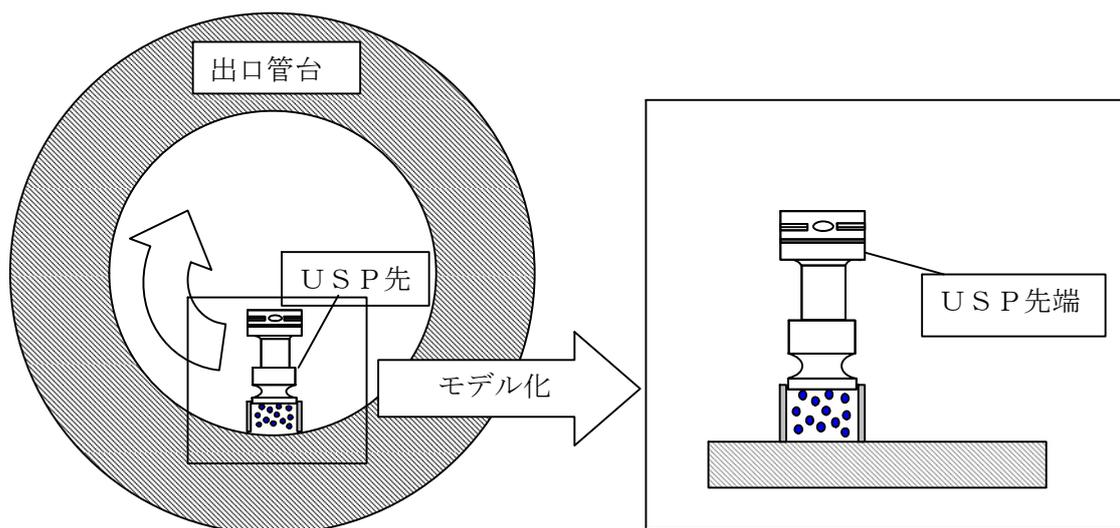
(*2) ピーニングヘッド面積に対するショットの投影断面積の比で定

(解説 4-6) 装置仕様

実機施工における装置は、施工要領確認試験の実施により明確にした装置仕様を満足する装置とする。実機施工においては、所定の仕様となっていることを事前動作確認などで確認する。

また、施工要領確認試験で明確にした装置仕様以外の装置を使用する必要が生じた場合は、その差異を明確にし、適切な技術的評価を実施することにより使用可能とすることができる。

PWR機器における施工例として、施工概念を解説図4-1に示す。



解説図 4-1 PWR機器に対するUSPにおける施工概念 (例)

(解説 5-1) 施工後の確認

施工後の確認としては、周波数、振幅、投射距離、投射時間の記録確認を行うとともに、ショット投入量及びショットに欠損のないことを確認することより、期待する応力改善効果が得られていることを確認する。また、施工表面に異常が生じていないことを目視試験 (VT-3) にて確認する。

予防保全工法ガイドライン
[ピーニング工法]

編集者 有限責任中間法人 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 有限責任中間法人 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)
FAX 03 (5440) 3606