

氏名	さとう よしき 佐藤 善紀		
本籍（国籍）	宮城県		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	工博 第245号		
学位授与年月日	平成26年 3月24日		
学位授与の要件	学位規則 第5条第1項該当 課程博士		
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻		
学位論文 題目	<b>インパクトフレットング試験による高温純水中の動的腐食に関する研究</b>		
学位 審査委員	主査 教授	岩淵 明	
	副査 教授	八代 仁	
	副査 教授	水野 雅裕	
	副査 東北大学教授	渡邊 豊	

## 論文内容の要旨

現在、電気エネルギーは人類の生活に欠かせない存在となっており、原子力利用による発電は世界の発電量の約14%担っている。しかし、原子力プラントの設計寿命は約30年といわれており、世界的に原子力プラントの高経年化が懸念されている。よって、これに付随して生じるトラブルについて対策および検討する必要があるといえる。原子力プラントにおいて冷却水の喪失は燃料棒のメルトダウンにつながる可能性があり、冷却水の循環する配管の保全は工学的に重要となる。配管系で生じるトラブルの一つに、液滴衝撃エロージョン

(Liquid Droplet Impingement, LDI) による配管の減肉現象が挙げられる。本論文ではこのLDIによる減肉現象は、衝撃による酸化皮膜の破壊と冷却水による新生面の酸化の一連の繰り返しによって生じているものと考え、高温純水中におけるインパクトフレットング試験から、LDIによる配管減肉現象のモデル解析を行った。

インパクトフレットングとは微小振幅による摩擦・摩耗現象であるフレットングに、荷重方向の振動を与えた動作であり、微小振幅でありながら摩擦面同士が離れることや、動的な荷重が負荷されることが特徴である。腐食環境においては摩擦面が離れることにより、新生面の確実な酸化が期待できる。かねてからこの酸化皮膜の剥離と生成といったプロセスによる摩耗は腐食摩耗と呼ばれ、摩擦による機械的作用と、酸化や腐食による化学的作用が相乗的に作用することが知られている。腐食摩耗では静的環境において生じる腐食とは異なり、一定の頻度で新生面が露出される。この新生面の露出した際の腐食が動的腐食となる。

本論文では高温純水が循環可能なインパクトフレットング装置を開発し、純水中における化学的影響に重点をおいた摩耗試験から、酸化皮膜の剥離と生成の一連の繰り返しによる

摩耗，動的腐食特性について検討した。

第 1 章では序論として原子力プラントが抱える問題や従来の研究内容及びその問題点について述べ，本論文の目的を記した。

第 2 章では開発したインパクトフレッシング試験装置の仕様及び詳細について述べ，装置の制御や動作特性について検討した。

第 3 章ではインパクトフレッシング及びフレッシング，インパクトによる試験からそれぞれの動作における摩耗特性を比較，検討した。これによりインパクトフレッシングによる摩耗量が他に比べ 1 オーダー以上大きく，インパクトとフレッシングによって，非接触状態における新生面の酸化およびスクレープ作用による新生面の露出が相乗的に作用したことが示唆された。

第 4 章では，検討するパラメータが多く，効率的に実験を進めるために，実験計画法における L18 直交表に基づいた実験を行った。これにより摩耗深さに対する各因子の影響の大きさを検討し，F 検定では水温及び荷重にそれぞれ危険率 1%，5% で有意である結果が得られた。

第 5 章では Cr 濃度を調整した炭素鋼やステンレス鋼の試験片を用い，純水中における新生面の腐食（動的腐食）特性に着目した試験から，水温や制御周波数（酸化時間）の影響について検討した。これにより水温 100°C までは水温とともに摩耗が大きくなるが，130°C では逆に大幅に低減される結果を得た。これは高温水中において

- ①Cr 水酸化物の成長が加速され，比較的厚く成長した
- ②高温水による水酸化物の縮合
- ③インパクトフレッシングによる皮膜の圧縮，緻密化

これらが摩耗特性に影響したと考えられ，形成された皮膜に対するナノインデンテーションから皮膜硬さの増加が確認された。また，この皮膜の形成には 110ms 程度の酸化時間が必要であることがわかった。

また，インパクトフレッシング摩耗（動的腐食）と静的腐食特性について比較，検討を行った。これにより静的環境において Cr 濃度の増加により耐食性が向上するが，インパクトフレッシング摩耗においては新生面上に薄い酸化皮膜が形成され，摩耗を促進する結果となった。これは不動態化剤  $\text{NaNO}_2$  水溶液中における摩耗試験からも裏付けられ，インパクトフレッシング摩耗といった動的な環境におけるステンレス鋼や高 Cr 材料の耐食性の低下が示唆された。

第 6 章では，摩耗モデルの構築から腐食摩耗における機械的作用及び化学的作用の定量化を試みた。さらに，摩耗の酸化時間依存性と水温依存性から摩耗モデルに基づいて整理し，

摩耗モデルのパラメータを算出した。これによれば、実プラントで生じている LDI による減肉率では化学的影響が無視できないレベルであることが示唆された。

また、電位急変法により得られる電気量から、ファラデーの法則により金属イオン溶出量を算出し、水温依存性をアレニウスの式から検討した。これにより得られた活性化エネルギーは第 5 章の摩耗モデルにより得られた値とほぼ一致し、高温純水中のインパクトフレティング摩耗により露出された新生面では電気化学的溶出が作用していることが裏付けられ、ミクロスケールにおけるセル形成による動的腐食プロセスが提案された。

第 7 章の結論では、第 3 章から第 6 章までの結言を総括し、本論文の工学的意義を述べている。

これらの実験的研究により、純水中の摩耗においても新生面の電気化学的作用による腐食は無視できないことが示唆され、配管減肉予測の高精度化に貢献する知見及びデータが得られた。また、高温純水中かつ動的な環境では炭素鋼の方がステンレス鋼よりも摩耗率が小さかったことから、配管材料等の機械構造物の材料選定において、配管環境の状態（流動状態や水温）の把握は必須といえる。さらに、ステンレス鋼では 130℃で厚い Cr 水酸化物に摩耗痕が覆われ、これが摩耗を低減させた。しかし、この皮膜の生成には一定以上の酸化時間が必要であり、酸化時間がこれに満たない場合、ステンレス鋼の摩耗は加速する可能性があることを提案できる。

## 論文審査結果の要旨

電気エネルギーは人類の生活に欠かせないが、火力、原子力等の多くの発電プラントの高経年化が世界的に懸念されている。プラントの配管系で生じるトラブルの一つに、液滴衝撃エロージョン（Liquid Droplet Impingement, LDI）による配管の減肉現象が挙げられる。本論文ではこの LDI による減肉現象は、液滴の衝撃による酸化皮膜の破壊と新生面の酸化の一連の繰り返しによって生じているものと考え、高温純水中におけるインパクトフレティング試験から、LDI による配管減肉現象のモデル解析を行った。

インパクトフレティングとはフレティングに荷重方向の振動を与えた動作であり、微小振幅でありながら摩擦面同士が離れることや、動的な荷重が負荷されることが特徴である。腐食環境においては摩擦面が離れることにより、新生面の酸化が予想される。静的環境において生じる腐食とは異なり、腐食環境で生じる腐食摩耗は一定の頻度で新生面が露出される動的腐食現象である。

本論文は 7 章から構成され、高温純水が循環可能なインパクトフレティング装置を開発し、純水中における電気化学的影響を重点においた摩耗試験から、酸化皮膜のはく離と生成の一連の繰り返しによる摩耗について検討している。

第 1 章では序論として原子力プラントが抱える問題や従来の研究内容及びその問題点につ

いて述べ、本論文の目的を記している。

第2章では開発したインパクトフレットング試験装置の仕様及び詳細について述べ、装置の制御や動作特性について検討している。

第3章ではインパクトフレットング及びフレットング、インパクトによる試験からそれぞれの動作における摩耗特性を比較、検討している。これによりインパクトフレットングによる摩耗量が他に比べ1オーダー以上大きく、インパクトとフレットングによって、非接触状態における新生面の酸化およびスクレープ作用による新生面の露出が相乗的に作用したことを示している。

第4章では、インパクトフレットングに影響するパラメータが多いので、効率的に実験を進めるために、実験計画法におけるL18直交表に基づいた実験を行った結果を述べている。これにより摩耗深さに対する各因子の影響の大きさを検討し、F検定では水温及び荷重にそれぞれ危険率1%、5%で有意である結果を得た。

第5章ではCr濃度を調整した炭素鋼やステンレス鋼の試験片を用い、純水中における新生面の腐食特性に着目した試験から、水温や制御周波数（酸化時間）の影響について検討している。これにより水温100℃までは水温とともに摩耗が大きくなるが、130℃では逆に大幅に低減される結果を示し、生成された酸化物の特性について考察している。

また、インパクトフレットング摩耗（動的腐食）と静的腐食特性について比較、検討を行っている。これにより静的環境においてCr濃度の増加により耐食性が向上するが、インパクトフレットング摩耗においては新生面上に薄い酸化皮膜が形成され摩耗を促進する結果を示し、インパクトフレットング摩耗といった動的な環境におけるステンレス鋼や高Cr材料の耐食性の低下を示唆している。

第6章では、摩耗モデルの構築から腐食摩耗における機械的作用及び電気化学的作用の定量化を試みている。さらに、摩耗の酸化時間依存性と水温依存性から摩耗モデルに基づいて整理し、摩耗モデルのパラメータを算出している。また、電位急変法により得られる酸化膜成長中の電気量から、ファラデーの法則により金属イオン溶出量を算出し、水温依存性をアレニウスの式から検討し、高温純水中のインパクトフレットング摩耗により露出された新生面では電気化学的溶出が作用していることを裏付け、ミクロスケールにおけるセル形成による動的腐食プロセスを提案している。

第7章の結論では、第3章から第6章までの結言を総括し、本論文の工学的意義を述べている。

本論文は発電プラントで顕著な液滴衝撃（LDI）による配管減肉現象をインパクトフレットングとしてモデル化し、高温水環境での材料の摩耗挙動に関する実験的研究である。高温中でのインパクトフレットング試験装置を開発し、金属表面の酸化（電気化学的な側面）と生成した酸化膜のはく離（トライボロジー的な側面）から減肉現象を科学的に考察している。結果は長期間のLDIによる減肉現象において動的酸化現象が無視できないことを示しており、配管減肉予測の高精度化に貢献する知見及びデータが得られ、工学的に重要な知見を示している。これらの成果は2編の学術論文として公表している。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

原著論文(1編)

高温純水中における SUS304 鋼のインパクトフレタイング摩耗に及ぼす化学的影響,  
佐藤善紀, 岩渕明, 内館道正, 八代仁, 保全学 (12 巻, 3 号, 96-104) 2013 年 10 月