高温インパクトフレットング試験による配管減肉現象の検討* (試験装置の開発及び影響因子のスクリーニング)

佐藤 善紀^{*1}, 岩渕 明^{*2}, 内舘 道正^{*3}, 八代 仁^{*4}

Examination of Pipe Wall Thinning Phenomenon by High Temperature Impact Fretting Testing (Development of a Test Rig and Screening of Effective Factors)

Yoshiki SATO^{*1}, Akira IWABUCHI, Michimasa UCHIDATE and Hitoshi YASHIRO

^{*1} Iwate Univ. Graduate School of Engineering
Ueda 4-3-5, Morioka-shi, Iwate, 020-8551 Japan

In this paper, to study the wear properties of the pipe materials for the nuclear power stations, a high temperature impact fretting test rig was developed. Employing two piezo actuators, this rig can generate impact fretting under various impact loads, fretting amplitudes and frequencies. It also enables us to control water temperature, dissolved oxygen and water pressure. AISI type 304 stainless steel, which is used as a pipe material in nuclear power stations, was used as specimens. Alumina balls were used as the counter materials. Wear property under impact fretting was severer than that under pure fretting and pure impact. The experiment according to L_{18} orthogonal table has shown that wear was strongly affected by the chemical factors. Especially, water temperature and frequency were significant in the analysis of the wear depth.

Key Words : Impact Fretting, Liquid Droplet Impingement, Corrosion, Wear, Stainless Steel, Nuclear Power Generation

1. 緒 言

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により、東京電力株式会社福島第一原子力発電所において冷却水の喪失から燃料棒のメルトダウンという深刻な事故が発生し、原子力発電所における装置の安全性、信頼性が問われることとなった。よって現在、国内の原子力発電所のほとんどが稼働を停止し、それらに対しストレステスト等の安全性評価試験が行われている。また、世界的にはエネルギー需要は増大しており、今後も原子力発電所の数は増加すると見られている^{(1)~(4)}。よって原子力発電所の適切な維持管理と同時に、稼働時に起こる事故などの対策について検討することは工学的に重要な課題である。

原子力発電所の安全性に関して、トライボロジーは重要な研究分野の一つである。例として、PWR (Pressurized Water Reactor) 蒸気発生器用伝熱管とその振れ止め金具におけるフレットング摩耗⁽⁵⁾や、原子炉圧力容器内の燃料被覆管とスペーサ間において、衝撃とフレットングが複合されて生じるインパクトフレットング摩耗^{(6)~(8)}、蒸気系配管内やタービンにおいて、高速液滴の衝突によるエロージョン (LDI, Liquid Droplet Impingement erosion) が原因となる管壁及びタービンプレードの減肉現象などが挙げられる。この LDI については、磯本ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や伊藤ら⁽¹¹⁾によりウォータージェットによるエロージョン試験が行われてきた。原子力発電所におけるタービンプレードの減肉現象については、Staniša ら⁽¹²⁾によって検討されている。また Sanchez⁽¹³⁾は、LDI による配管の減肉は、液滴速度の 4 乗に比例する予測式を構築した。これらは LDI の機械的作用としての表面損傷の検討といえる。

しかし、原子力発電所の 2 次冷却系配管中では、管壁表面に水膜が生じている部位が存在すると考えられ、酸

* 原稿受付 2012 年 3 月 22 日

^{*1} 正員, 岩手大学 工学研究科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

^{*2} 正員, フェロー, 岩手大学 工学部

^{*3} 正員, 岩手大学 工学部

^{*4} 岩手大学 工学部

E-mail: t5711003@iwate-u.ac.jp

化や腐食の影響は無視できない^{(14)~(16)} (図 1 (a)). LDI が管壁に与える影響について、

- ① 管壁に生じた酸化皮膜の機械的破壊
- ② 衝突領域での液膜の生成と、新生面の再酸化

の 2 点に特に着目する場合、ウォータージェット試験等における液滴の衝突頻度 ($10^5 \sim 10^7 \text{ Hz/mm}^2$ 程度) よりも低い衝突頻度が必要と考えられる⁽¹⁷⁾. そこで著者らは、酸化皮膜の形成と LDI による機械的破壊の繰り返しによる減肉プロセスを理解するため、配管材料のフレッティング摩耗試験を行ってきた⁽¹⁸⁾. しかし、フレッティング試験では衝突による影響を考慮できなかったことや、新生面の一部が水中に露出していない可能性があり、相対的に図 1 (b) に示すような動作を可能とした試験装置が必要と考えた.

よって本研究では、酸化皮膜の生成と機械的破壊の作用をより詳細に検討するため、高温水中で試験が可能なインパクトフレッティング装置を開発する. そして、高温純水中における原子炉配管材料 (SUS304 ステンレス鋼) の摩耗特性について検討する.

2. 実験方法

2・1 実験装置

本研究で開発した装置の概略図を図 2 に示す. 純水が充填されたオートクレーブ容器 (⑤) 内において、各摺動軸 (X 方向, Z 方向) を振動させ、Z 方向軸端に取り付けられた上部試験片 (⑥) と X 軸上部に取り付けられた下部試験片 (⑦) にインパクトフレッティングを発生させる. 各軸の駆動には piezo アクチュエータ (①と④, 最大振幅約 $130 \mu\text{m}$, 予荷重 800 N , 最大荷重 2 kN) を用い、Z 方向の振動を X 方向の 2 倍の振動数となるように調和させている. よって、上部試験片は下部試験片が 1 往復する間に 2 回衝突する. X 方向の接線力と Z 方向の荷重は、軸に取り付けられたひずみゲージを貼ったロードセル (②, ③) により測定する. さらに、渦電流式変位計 (⑨) より X 方向の軸端の変動距離を測定し、piezo アクチュエータの変位は内蔵されたひずみゲージにより測定する. オートクレーブは SUS316L 製の円筒型で、最高使用温度 130°C , 最高使用圧力 2 MPa , 容量は約 2 L である. ガasket はシリコンゴムの O リングであり、ボルトで締め付けることにより密閉される. 圧力は最大流量 20 ml/min の高圧ポンプにより上昇させる. オートクレーブに供給する水は、水道水をイオン交換樹脂に通して脱イオン処理を行った純水であり、電気伝導度は 0.20 mS/m 以下とした. また、リザーブタンク内で N_2 及び $\text{N}_2 + \text{O}_2$ のエアレーションにより水中の溶存酸素量を調整している. オートクレーブ内の水はオートクレーブに巻きつけた電気式バンドヒーターにより加熱され、温度はオートクレーブ内に取り付けられた熱電対により測定している. バンドヒーターの電流は、水温調整器により PID 制御され、水温を一定に保っている. また、測定時におけるノイズを極力抑えるため、X 方向のロードセル (③) 部分にも SUS316 製容器が設けられており、ここにも水を循環させ、オートクレーブ中と同様の環境としている. その他の設定可能な範囲は、インパクト荷重 $1.5 \sim 7 \text{ N}$, 各方向振動周期 $0 \sim 30 \text{ Hz}$, 振幅 $0 \sim 70 \mu\text{m}$ であり、この装置はインパクトフレッティングだけでなく、インパクトのみ、フレッティングのみの実験も可能である.

測定・制御システムのブロックダイアグラムを図 3 に示す. PC には A/D コンバーターボード (16bit) と D/A コンバーターボード (12bit) が接続されている. A/D コンバーターボードにより、X, Z 方向の力, X, Z 方向の piezo アクチュエータの駆動電圧, X, Z 方向の piezo アクチュエータの変位, X 軸の軸端での変位が記録される. piezo アクチュエータの駆動電圧は、D/A コンバーターボードから $0 \sim 5 \text{ V}$ の電圧としてアンプへ送られ、さらに約 40 倍に増幅されて供給される. インパクトフレッティング試験において、各軸へ以下の正弦波状の駆動電圧 V

Fig. 1 Schematic diagram of LDI and impact fretting

が供給される．

$$V = A \sin(2\pi f \cdot t + s\pi) + V_0 \quad (1)$$

ここで、 A は電圧の振幅、 f は振動数、 t は時間、 s は初期位相、 V_0 はオフセット電圧である．そして、この電圧の振幅 A は、以下の PI 制御により調整される．

$$\Delta A(t) = K_p \Delta w(t) + K_i \int_0^t \Delta w(\tau) d\tau \quad (2)$$

ここで、 ΔA は振幅 A の修正量、 t は時間、 K_p は比例ゲイン、 Δw は目標値と測定値とのずれ、 K_i は積分ゲインである．本研究では、 Z 方向の全振幅の $1/2$ の位置で試験片同士が衝突するように式(1)のパラメータを設定する．よって、試験片同士が接触する振幅は X 方向の全振幅の約 71% ($1/\sqrt{2}$ 倍) となる．例として、 X 及び Z 方向の振幅を $100\mu\text{m}$ とした場合、上部試験片の下部試験片に対する軌道は図 4 ようになる．試験片同士が接触しない場合、点線に沿って動作し、試験片同士が接触する場合、実線に沿って動作する．試験片同士が接触し、さらに変位が加えられることで荷重が付加されることがわかる．実際に、インパクト荷重を 5N 、 Z 方向の振動数を 2Hz として動作させた場合の X 、 Z 各方向の力の測定結果を図 5 に示す．これを見ると、 Z 方向の力から、上部試験片と下部試験片が接触と非接触を一定周期で繰り返しており、PI 制御によりほぼ一定荷重で制御されているのがわかる． Z 方向の荷重は、1 回の衝突毎にピーク値が 0.2N 程度上下しているが、これは試験片同士の摩擦力により、 Z 軸のロードセルに対し曲げモーメントが生じたためと推測される． X 方向の力については、半周期毎にピークの波形が異なっている．これは、 O リングの変形抵抗が往復運動における「往」と「復」で均等にかかっていないことが原因である．

2・2 試験片

本研究で使用する試験片の化学組成と機械的特性、表面粗さを表 1 に示す．ビッカース硬さの測定にはダイヤモンドビッカース圧子（対面角 136° ）を用い、試験荷重 4.9N 、試験力保持時間 15 秒とした．表面粗さの測定面積は X 方向 $500\mu\text{m} \times Y$ 方向 $500\mu\text{m}$ 、測定ピッチは X 方向 $1\mu\text{m}$ 、 Y 方向 $10\mu\text{m}$ とした．上部試験片には、様々な環境において安定で耐摩耗性に優れたアルミナボール（直径 6.4mm ）を用いた．下部試験片には配管材料である SUS304 のディスク（直径 11.5mm 、厚さ 2.7mm ）を用い、その表面はバフ研磨により鏡面仕上げとした．

2・3 測定方法

SUS304 ディスクに生じた摩耗痕を走査型電子顕微鏡（SEM）や電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）を用いて分析、観察した．ここで、SUS304 の配管減肉においては減肉した深さが問題となるため、最大摩耗深さを主な評価パラメータとして用いた．最大摩耗深さは、触針式三次元表面粗さ計によって摩耗表面を測定し、得られた表面プロファイルの基準表面より下部の深さとして算出した．なお、次節で用いた摩耗量は同じように測定した表面プロファイルから算出される体積損失である．

Fig. 2 Schematic diagram of the impact fretting test rig

Fig. 3 System diagram of the impact fretting test rig

Fig. 4 Relative trajectory of the upper specimen against the lower specimen

Fig. 5 Impact force and friction force (impact load 5N, frequency in Z dir. 2Hz)

Table 1 Chemical composition (mass%), Vickers hardness number Hv, Young's modulus E , Poisson's ratio ν and surface roughness S_a of the test specimens

Alumina	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Hv	E [GPa]	ν	S_a [μ m]		
	0.15	0.04	0.19	0.02	0.02	bal.	1800	390	0.24	0.07		
SUS304	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	Hv	E [GPa]	ν	S_a [μ m]
(AISI type 304)	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.00	8.00	bal.	300	200	0.30	0.03

 S_a : arithmetic mean height of the surfaces

3. 実験結果及び考察

3・1 インパクトフレッティングの摩耗特性

インパクトフレッティングの衝撃と摩擦の相互作用について検討するため、表2の条件でフレッティングとインパクト及びインパクトフレッティングの摩耗試験を行った。表2におけるインパクトフレッティング試験のX方向の振幅は、非接触状態を含む全振幅であり、実験時の測定データから得られた接触振幅は40μmであった。これは、フレッティング試験における振幅と一致する。本実験では、振動数を一定、平均荷重を一定としたため、SUS304 ディスクに生じる摩耗痕がアルミナボールから受けた力積量（荷重×負荷時間）は一定である。得られた摩耗量及び最大摩耗深さを図6に示す。これによれば、インパクトフレッティングの摩耗量、摩耗深さは他と比較して非常に大きな値をとり、インパクトのみ、フレッティングのみの値を足し合わせても及ばない程である。

これは、インパクトフレッティングにより化学的作用である酸化皮膜の生成と、機械的作用である酸化皮膜のはく離が促進され、相乗作用的に摩耗を激しくした可能性を示唆している⁽¹⁹⁾。

次に、インパクトフレッティングにおける接触圧力を算出し、他の研究結果と比較、検討する。ヘルツの接触理論⁽²⁰⁾から、荷重 5N における平均接触圧力は 0.83GPa、最大接触圧力は 1.2GPa である。しかし摩耗が進行した際、接触面は平面と球面から曲面同士の接触へと変化する (図 7)。そこで、アルミナボール及び SUS304 ディスクの摩耗痕の曲率半径を二次曲面近似により算出し (図 7 中の r_1 , r_2)、接触圧力を求めたところ、平均接触圧力は 0.23GPa、最大接触圧力は 0.34GPa であった。これは井小萩ら⁽²¹⁾の液滴衝突の数値解析結果である、直径 10mm の液滴が 300m/s で衝突した際の相当応力 0.38GPa に近い値を示している。さらに、本実験における摩耗深さを年間減肉深さに換算すると、2.8mm/年程度となり、この減肉速度は実際の原子力発電所で生じた LDI による配管減肉とほぼ同程度⁽²²⁾となった。

Table 2 Experimental conditions to examine the effects of type of relative motion

Water pressure, MPa	0.5
Impact load, N	3.5 (Fretting), 5 (Impact, Impact fretting)
Water temperature, °C	80
Amplitude (in X dir.), μm	0 (Impact), 40 (Fretting), 50 (Impact fretting)
Frequency (in Z dir.), Hz	2
Dissolved oxygen, ppm	0.01
Number of cycles	50,000
Number of experiments	1

Fig. 6 Wear volume and maximum wear depth of the steel disks under impact, fretting and impact fretting after 50,000cycles

Fig. 7 Surface profiles of the impact fretting wear scars (r_1 , r_2 : Radius of curvatures of the best fit elliptic paraboloid)

3・2 L₁₈実験

原子炉配管の減肉現象は、様々な環境条件によってその挙動が変化すると考えられる。よって、効率的に実験を行い各因子の影響の大きさについて検討するため、実験計画法に基づく直交表 L₁₈⁽²³⁾に従った実験条件によりインパクトフレッティング試験を行った。直交表を用いることで各因子がベクト的に直交し、少ない実験回数で各因子を独立に評価することができる。また、測定結果に対し分散分析を行うことで、各因子の有意差を算出することも可能である。ここでは容器内の圧力、インパクト荷重、水温、振動数、振幅、溶存酸素量をそれぞれ変更して試験を行い、摩耗深さに対する各因子の影響の大きさを検討した。表 3 に直交表に用いる因子の水準、表 4 に直交表 L₁₈ と得られた最大摩耗深さの平均値を示す。荷重 3~5N における初期状態のヘルツの平均接触圧は、0.70~0.83GPa、最大接触圧は 1.1~1.2GPa である。

表 5 に分散分析表を示す。ここでは各因子の影響は誤差であるという帰無仮説をもとに F 検定を行った。F 検定では、各因子の分散を誤差分散で割った分散比 F_0 に対し、自由度 f に対応した確率分布 (F 分布) により、仮

説が成り立つ確率である P 値を求めることができ、各因子の影響が有意であるか評価することができる。例として P 値が 1% であった場合、1% の確率で帰無仮説が成り立つ。言い換えれば、1% の危険率でその因子が有意である (99% 誤差ではない) ことになる。本実験では、最大摩耗深さによる各因子の分散比 F_0 に対し得られた P 値から、インパクト荷重は 5%、水温は 1% の危険率で有意であるという結果が得られた。

次に図 8 の要因効果図から、各因子の摩耗特性に対する影響について検討する。要因効果図とは、各因子、各水準の実験結果の平均を用い、プロットしたものである。例として、荷重 3N のプロットには、表 4 における No.1, 2, 3, 10, 11, 12 の実験結果の平均値を用いる。図 8 から、インパクト荷重が 4N において摩耗深さは最大をとり、5N で最小をとっている。これは、SUS304 ディスクの摩耗量が、アルミナボールから与えられる荷重に単純には比例しないことを示している。

Table 3 Experimental conditions for the L_{18} orthogonal table

A	Water pressure, MPa	0.6, 1.1
B	Impact load, N	3, 4, 5
C	Water temperature, °C	30, 90, 130
D	Amplitude (in X dir.), μm	30, 50, 70
E	Frequency (in Z dir.), Hz	5, 10, 20
F	Dissolved oxygen, ppm	0.01, 0.1, 8
	Number of cycles	10,000
	Number of experiments	3

Table 4 L_{18} orthogonal table and results of experiments

Test No.	A Water pressure [MPa]	B Impact load [N]	C Water temp. [°C]	D Amp. (in X dir.) [μm]	E Freq. (in Z dir.) [Hz]	F Dis. oxygen [ppm]	Results Max wear depth [μm]
1	0.6	3	30	30	5	0.01	1.0
2	0.6	3	90	50	10	0.1	1.7
3	0.6	3	130	70	20	8	1.4
4	0.6	4	30	30	10	0.1	0.97
5	0.6	4	90	50	20	8	2.0
6	0.6	4	130	70	5	0.01	2.3
7	0.6	5	30	50	5	8	0.61
8	0.6	5	90	70	10	0.01	0.96
9	0.6	5	130	30	20	0.1	1.8
10	1.1	3	30	70	20	0.1	0.86
11	1.1	3	90	30	5	8	2.8
12	1.1	3	130	50	10	0.01	1.6
13	1.1	4	30	50	20	0.01	1.1
14	1.1	4	90	70	5	0.1	2.2
15	1.1	4	130	30	10	8	1.9
16	1.1	5	30	70	10	8	0.63
17	1.1	5	90	30	20	0.01	1.2
18	1.1	5	130	50	5	0.1	1.4

Amp.: Amplitude, Dis. oxygen: Dissolved oxygen

Table 5 Analysis of variance table of the L_{18} experiment

Factor	f	S	MS	F_0	P (%)
Water Pressure	1	0.067	0.067	0.51	50
Impact load	2	1.4	0.71	5.3	4.8
Water temperature	2	3.3	1.7	13	0.72
Amplitude (in X dir.)	2	0.18	0.091	0.69	54
Frequency (in Z dir.)	2	0.60	0.30	2.3	19
Dissolved oxygen	2	0.092	0.046	0.35	72
Error	6	0.79	0.13		
Total	17	6.4			

f : degree of freedom, S : sum of squares, MS : mean squares, F_0 : variance ratio, P : p-value

Fig. 8 Effect of factors obtained from the L_{18} experiment

水温について、30°C から 90°C にかけて摩耗深さは 0.87 μm から 1.8 μm と比較的大きく増加し、130°C では 1.7 μm とわずかに減少する結果となった。水温 130°C において摩耗深さが増加しなかったことについては、高温環境におけるフレッティングでは酸化物が摩耗痕上に堆積し、それらが摩耗を抑制することが原因と考えられる⁽²⁴⁾。

これについて、図 9 の EPMA による分析結果では、Cr が非摩耗面よりも 5% 程度増加しており、Cr リッチな酸化皮膜が堆積していると考えられる。さらに、粒状の Al が摩耗痕に残留しており、これらが SUS304 ディスクの摩耗をマイルドにしたと考えられる。図 10 の EDS スペクトルからも、摩耗痕表面では非摩耗面よりも Al, Cr, O が多く検出されているのがわかる。今後、水温 130°C における配管減肉現象を評価する上で、アルミナボールの摩耗が SUS304 ディスクの摩耗に及ぼす影響や、適切な実験条件について検討が必要である。

一方、圧力や振幅、振動数、溶存酸素濃度では、分散分析において有意な差は得られなかったが、過去のフレッティング摩耗に関する研究⁽¹⁸⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾では、振動数の増加に伴い摩耗量は減少することがわかっている。図 8 では 10Hz で摩耗深さが最小となり、谷型のプロットとなっていることがわかる。その原因については、各実験で因子がそれぞれ異なるように設定されるため、この L_{18} 直交表による実験結果の比較から断定することは難しい。よって、次節において振動数の影響について検討する。

Fig. 9 SEM, EPMA images and results of the quantitative analysis of the wear scar on the steel disk (No.12 of the L_{18} experiment, Table 4)

Fig. 10 Comparison of the EDS spectrum distribution between the wear scar on the steel disk (No.12 of the L₁₈ experiment, Table 4) and initial surface

3・3 振動数の影響の検討

前節より、インパクトフレッティング摩耗において、振動数の影響が明らかになれば、機械的作用と化学的作用の相乗作用の裏付けにつながると考えられる。よって、本実験では表 6 の条件に従って実験を行った。

SUS304 ディスクに生じた摩耗痕の最大摩耗深さを図 11 に示す。振動数が高くなるほど最大摩耗深さは減少する傾向が見られ、摩耗特性は振動数に依存しているのがわかる。これはすなわち、振動数が小さいほど化学的作用である酸化皮膜の生成時間が長くなり、形成される酸化皮膜は厚くなる。そこにフレッティングの機械的作用であるすくい (scrape) 作用が働き、1 サイクルあたりにはく離される酸化皮膜の厚さは増大する。これが繰り返されることから、振動周期の差が摩耗特性に影響したと考えられる。振動数と摩耗深さの両軸を対数でプロットした場合、図 11 のように直線で近似することができ、傾きは -0.26 をとった。これは、文献⁽¹⁸⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾と一致する傾向であり、やはり酸化皮膜の生成とはく離が摩耗深さに影響を与えることを示している。

Table 6 Experimental conditions for the detailed examination of the effect of frequency

Water pressure, MPa	0.1
Impact load, N	3
Water temperature, °C	75
Amplitude (in X dir.), μm	30
Frequency (in Z dir.), Hz	2, 10, 20
Dissolved oxygen, ppm	0.01
Number of cycles	10,000
Number of experiments	3

Fig. 11 Effect of frequency on maximum wear depth of the steel disks after 10,000 cycles

4. 結 言

本研究では 130°C までの高温水中におけるインパクトフレッティング試験が可能な装置を開発した。そして、SUS304 のインパクトフレッティング摩耗特性を検討した結果、摩耗量、摩耗深さはインパクトのみ、フレッティングのみの場合よりも大きく、摩耗深さは特に温度と振動数に左右されることがわかった。これは、配管減肉特性の検討において機械的作用と化学的作用の相乗作用を考慮する必要があることを示唆している。振動数について、L₁₈ 実験では有意差は得られない結果となったが、他の因子との相互作用による影響が考えられ、高い振動数で摩耗深さを増大させる条件が存在する可能性がある。

本研究で行った実験は、配管減肉で影響の大きいと考えられる因子のスクリーニングであり、今後は振動数及び水温の影響についてより詳細に検討する予定である。また、高温水中におけるアルミナボールの摩耗挙動や、その配管減肉の評価への影響についても検討する。

謝 辞

本研究は、経済産業省原子力安全・保安院「高経年対策強化基盤整備事業」の一環で行われた。

文 献

- (1) 宮尾恵美, “[中国] 原発の積極的推進から安全第一へ”, 国立国会図書館, Vol. 247, No. 2 (2011) <http://www.ndl.go.jp/jp/data/publication/legis/pdf/02470212.pdf> (参照日 2012 年 4 月 18 日).
- (2) 井樋三枝子, “[アメリカ] オバマ大統領の原発政策の継続—「確実に安全なエネルギーの未来のための青写真」の発表—”, 国立国会図書館, Vol. 247, No. 2 (2011) <http://www.ndl.go.jp/jp/data/publication/legis/pdf/02470203.pdf> (参照日 2012 年 4 月 24 日).
- (3) 藤原夏人, “[韓国] 政府は原子力推進政策を継続”, 国立国会図書館, Vol. 247, No. 2 (2011) <http://www.ndl.go.jp/jp/data/publication/legis/pdf/02470211.pdf> (参照日 2012 年 4 月 24 日).
- (4) 小泉悠, “[ロシア] 原子力安全政策の現状”, 国立国会図書館, Vol. 247, No. 2 (2011) <http://www.ndl.go.jp/jp/data/publication/legis/pdf/02470210.pdf> (参照日 2012 年 4 月 24 日).
- (5) 米澤利夫, “原子力プラント機器・部材におけるトライボロジーとその課題”, トライボロジスト, Vol. 53, No. 3 (2008) pp.169-174.
- (6) S. M. Hong, and I. S. Kim, “Impact fretting wear of alloy 690 tubes at 25°C and 290°C”, *Wear*, Vol. 259 (2005) pp.356-360.
- (7) D. Kaczorowski, J. M. Georges, Sandrine BEC, A. Tonck, A. B. Vannes, and J. P. Vernot, “Wear of a stainless steel in pressurised high temperature water”, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IV - Physics*, Vol. 2, No. 5 (2001) pp.739-747.
- (8) H. Attia, Y. B. Gessesse, and M. O. M. Osman, “New parameter for characterizing and correlating impact-sliding fretting wear to energy dissipation – experimental investigation”, *Wear*, Vol. 263 (2007) pp.419-429.
- (9) 宮田寛和, 磯本良則, “液滴衝突エロージョン現象と実用材料の寿命予測 (第 1 報)”, 材料と環境, Vol. 57 (2008) pp.138-145.
- (10) 磯本良則, 宮田寛和, “液滴衝突エロージョン現象と実用材料の寿命予測 (第 2 報)”, 材料と環境, Vol. 57 (2008) pp.146-152.
- (11) 伊藤洋茂, 岡部永年, “金属材料の液滴エロージョン評価”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 59, No. 567 (1993) pp.264-269.
- (12) B. Staniša, Z. Schauerl, and K. Grilec, “Erosion behavior of turbine rotor blades installed in the Krsko nuclear power plant”, *Wear*, Vol. 254 (2003) pp.735-741.
- (13) L. E. Sanchez-Caldera, “The mechanism of corrosion- erosion in steam extraction lines of power stations”, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1984) pp.196-208.
- (14) 渡辺豊, 庄子哲雄, 高橋秀明, “炭素鋼の気液二相流中エロージョン・コロージョン損傷機構と損傷発生条件”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 55, No. 519 (1989) pp.2294-2298.
- (15) 渡辺豊, 阿部博志, “酸化皮膜の特徴抽出に基づく炭素鋼 FAC 速度の考察”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 76, No. 763 (2010) pp.433-435.
- (16) 稲垣武之, 小林照明, 島田森, 井上龍介, 薄葉智, 木村剛生, “福島第一原子力発電所 6 号機における液滴衝撃エロージョンによるタービン中期配管損傷とその対応について”, 保全学, Vol. 9, No. 4 (2011) pp.63-67.
- (17) T. Ikohagi, S. Ebara, N. Fujisawa, H. Hashizume, A. Iwabuchi, M. Sato, M. Uchidate, T. Yamagata, and H. Yashiro, “Advanced Wall Thinning Prediction of Liquid Droplet Impingement Erosion”, *International Symposium on the Aging Management & Maintenance of Nuclear Power Plants* (2010) pp.47-57.

- (18) 平山有沙, 岩渕明, 八代仁, 三田村仁, “純水中における炭素鋼のフレッティング特性”, 日本機械学会東北支部秋季講演会講演論文集, Vol. 2008, No.44 (2008) pp.109-110.
 - (19) A. Iwabuchi, J. W. Lee, and M. Uchida, “Synergistic effect of fretting wear and sliding wear of Co-alloy and Ti-alloy in Hanks’ solution”, *Wear*, Vol. 263 (2007) pp.492-500.
 - (20) (社)日本機械学会, “機械工学便覧デザイン編β4 機械要素・トライボロジー”, 丸善 (2005) pp.145-146.
 - (21) 芝田篤史, 齊藤由典, 中森一郎, 井小萩利明, “液滴と個体の衝突減少の数値解析”, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集(2), Vol. 2005, No.2 (2005) pp.161-162.
 - (22) 東北電力株式会社, “第 7 回定期検査における配管肉厚測定結果について”, 東北電力株式会社プレスリリース, <http://www.tohoku-epco.co.jp/whats/news/2005/50517b3.htm#01> (参照日 2011 年 12 月 27 日).
 - (23) 岩崎学, “統計的データ解析入門 実験計画法”, 東京図書 (2006) pp.80-85.
 - (24) 岩渕明, “フレッティング摩耗の特異性について”, トライボロジスト, Vol. 35, No. 6 (1990) pp.386-391.
 - (25) R. B. ウォーターハウス, 佐藤準一 (訳), “フレッティング損傷とその防止法”, 養賢堂 (1984) pp.114-115.
-