JAEA-Review 2019-007 DOI:10.11484/jaea-review-2019-007



# 固液二相流中の金属材料の損傷および 腐食に関する調査報告書

Report of the Erosion-corrosion of Metallic Materials under Solid-liquid Two Phase Flow

大谷 恭平 佐藤 智徳 加治 芳行 山本 正弘

Kyohei OTANI, Tomonori SATO, Yoshiyuki KAJI and Masahiro YAMAMOTO

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター 廃炉リスク管理研究ディビジョン

Research Division for Potential Risk Reduction in Decommissioning Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development - Review

日本原子力研究開発機構

July 2019

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

# 固液二相流中の金属材料の損傷および腐食に関する調査報告書

日本原子力研究開発機構

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター 廃炉リスク管理研究ディビジョン

大谷 恭平、佐藤 智徳、加治 芳行、山本 正弘

(2019年3月31日受理)

液体固体粒子を含んだ流体による流れ(固液二相流)を取り扱う配管などの構成材料は、固液 二相流中の固体粒子の衝突によってエロージョンと呼ばれる損傷が生じる。固液二相流の液体が 腐食性溶液である場合、溶液は更に化学的に作用してエロージョン・コロージョンと呼ばれる損 傷が生じる。福島第一原子力発電所(1F)の廃炉作業で実施が予定されているデブリ取り出し作 業の際には、破砕されたデブリ微粒子による循環冷却ラインの配管の損傷が懸念される。そのた め、固液二相流における金属材料のエロージョンおよびエロージョン・コロージョンに関する文 献調査を実施した。文献調査結果より、これらの現象による金属材料の損傷速度は静止水中の腐 食に比べて極めて多様な因子の影響を受けて変化することがわかった。

本調査の結果、1Fのデブリ取り出し時に設置される冷却系配管の材料についてはクロムを含む 鋼材や耐食性の高いステンレス鋼の使用が望ましいと考えられる。また、エロージョン・コロー ジョンの解析では、誤った条件や曖昧な条件で試験を実施すると金属材料の損傷速度の変化に影 響する因子が適格に判別できず、事実と異なる認識をしてしまう危険性があることも分かった。 このため、1Fのデブリ取り出し時において発生すると予測される粉砕微粒子が配管等の機器材料 に与える影響を正確に評価するためには、金属材料の損傷速度に大きく影響を与える環境条件や 1F 特有の放射線によるラジオリシス等の因子を考慮した上で試験を行う必要がある。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

# Report of the Erosion-corrosion of Metallic Materials under Solid-liquid Two Phase Flow

Kyohei OTANI, Tomonori SATO, Yoshiyuki KAJI and Masahiro YAMAMOTO

Research Division for Potential Risk Reduction in Decommissioning Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2019)

Metallic pipes under solid-liquid two phase flow is damaged by collision of solid particle to the pipe walls, and this phenomenon is named "erosion". In the case of the liquid is corrosive solution, further damage is occurred on the pipe walls chemically, and this named "erosion-corrosion". In the Fukushima Daiichi decommissioning project, the fuel debris will be crushed during removal operation of the debris and micro debris particles would be generated. It is estimated that the pipes of the circulating cooling system would be damaged under the solid-liquid two phase flow containing fuel debris particles. For the reason, the previous study about erosion and erosion-corrosion of metallic materials under solid-liquid two phase flow was surveyed. The survey showed that the damage rate by erosion and erosion-corrosion is influence by a lot of parameter in comparison to the corrosion rate which occurred in no-flow solution. Therefore, it is necessary to pay attention to selecting the experimental method and condition before the investigation about erosion-corrosion of metallic materials under solid-liquid two phase flow is carried out.

Keywords: Corrosion, Erosion, Erosion-corrosion, Carbon Steel, Iron, Stainless Steel

# 目次

1. はじめに	. 1
2. 固液二相流によるエロージョンおよびエロージョン・コロージョンの試験装置	. 1
2.1 流動型試験装置	. 1
2.2 回転型試験装置	. 2
2.3 噴流型試験装置	2
2.3.1 すきま噴流法	. 2
2.3.2 上昇噴流法	2
3. 固液二相流によるエロージョン	. 5
3.1 衝突速度の影響	. 5
3.2 衝突角度の影響	. 5
3.3 粒子形状の影響	. 5
3.4 粒子径、粒子硬さ、粒子濃度の影響	. 6
3.5 鋼材のクロム含有量の影響	. 6
3.6 温度の影響	6
4. 固液二相流によるエロージョン・コロージョン	. 9
4.1 衝突速度と pH の影響	. 9
4.2 衝突角度と pH の影響	. 9
4.3 塩化物イオン濃度の影響 (FAC)	10
4.4 温度の影響(FAC)	10
4.5 クロム含有量の影響 (FAC)	10
5. おわりに	13
参考文献	13

# Contents

1. Introduction	1
2. Testing appratus for erosion and erosion-corrosion	1
2.1 Flowing type test apparatus	1
2.2 Rotating type test apparatus	2
2.3 Jet type test apparatus	2
2.3.1 Crevice jet method	2
2.3.2 Rising jet method	2
3. Erosion under solid-liquid two phase flow	5
3.1 Effect of impact velosity	5
3.2 Effect of impact angle	5
3.3 Effect of particle shape	5
3.4 Effects of particle size, particle hardness, and particle concentration	6
3.5 Effect of chromium concentration of steel	6
3.6 Effect of temperature	6
4. Erocion-corrosion under solid-liquid two phase flow	9
4.1 Effects of impact velosity and pH	9
4.2 Effects of inpact angle and pH	9
4.3 Effect of chloride ions (FAC) 1	0
4.4 Effect of temperature (FAC) 1	.0
4.5 Effect of chromium concentration of steel (FAC)	0
5. Conclusion 1	.3
References 1	3

# 図リスト

Fig .1 Schematic representation of a test loop	3
Fig. 2 Schematic representation of a rotating erosion testing apparatus	3
Fig. 3 (a) Schematic representation of a jet-in-slit testing apparatus 1. Test Section, 2. Fluidized-bed,	
3. Settling separator, 4. Distributor, 5. Pump, 6. Venturi, 7. Heater, 8. Valve. (b) Test section	
1. Specimen, 2. Guide plate, 3. Nozzle	3
Fig. 4 Schematic representation of fountain-jet testing apparatus	4
Fig. 5 Relation between indentation depth ratio and impact velocity	7
Fig. 6 Relationship between erosion damage and impact angle	7
Fig. 7 Effect of particle shape on weight-loss of stainless steel by erosion	7
Fig. 8 Effect of particle size on weight loss of stainless steel by erosion	8
Fig. 9 Effect of Cr concentration of steel on erosion loss of steel	8
Fig. 10 Influence of velocity on erosion-corrosion rate of carbon steel in various pH solution	11
Fig. 11 Influence of impact angle on erosion-corrosion rate of iron in various pH solution	11
Fig. 12 Effect of flow speed on corrosion rate of carbon steel in solution which has various Cl-	
concentration	12

This is a blank page.

## 1. はじめに

液体固体粒子を含んだ流体による流れ(固液二相流)を取り扱うポンプや配管などの構成材料 は、固液二相流中の固体粒子の衝突によって変形や剥離の破壊が生じる。この現象は化学的な作 用を含まない機械的な破壊によるもので、エロージョンと呼ばれる<sup>[1-5]</sup>。一方、固液二相流の液体 が塩化物イオンを含んでいたり強い酸性である等の理由により腐食性溶液である場合、配管はエ ロージョンと同時に化学的な作用によって腐食する。このようにエロージョンとコロージョンが 複合した場合、その現象はエロージョン・コロージョンと呼ばれる<sup>[6-11]</sup>。なお本報ではエロージョ ンやエロージョン・コロージョンによって構造材料に生じる破壊や減肉、質量減少を損傷と呼称 する。

福島第一原子力発電所(1F)の廃炉に向けて 2021 年 12 月にはデブリ取り出しを開始する予定と なっており<sup>[12]</sup>、デブリ取り出しの際には取り出し方法によらずデブリの破砕を実施することは確 実と考えられている。破砕時にはデブリ微粒子が発生して循環冷却ラインへ混入すると予想され、 デブリ粒子を含んだ固液二相流による循環冷却ラインの配管の損傷が懸念される。そのため、固 液二相流における金属材料のエロージョン・コロージョンに関する知見が必要である。

本報では、固液二相流中における金属材料のエロージョン・コロージョンに関する既往研究の 調査結果に基づいて、腐食試験方法と腐食試験装置を整理し、固液二相流による金属材料のエロ ージョンとエロージョン・コロージョンについて説明する。一方、流れ加速型腐食(FAC)につい てはエロージョン・コロージョンを流れによって加速される腐食の現象だとみなして FAC として 捉えるケースもあるが<sup>[13]</sup>、本報では FAC を固体粒子を含まずに流れによってのみ加速される腐食 現象として定義し、別の現象として考える。

## 2. 固液二相流によるエロージョンおよびエロージョン・コロージョンの試験装置

固液二相流における金属材料のエロージョンおよびエロージョン・コロージョンの試験装置の 種類は多岐にわたるが、流動型、回転型、噴流型と大きく3つに分けることができる。

#### 2.1 流動型試験装置

流動型試験装置には循環式<sup>[14,15]</sup>および一過式<sup>[16]</sup>がある。Fig. 1 に示す循環式では耐食性材料で ある硬質塩化ビニル製の配管ループの一部に金属製の供試管をセットし、配管内に固体粒子を含 む溶液を循環させることで供試管の損傷速度を調査する。直管試験時には Fig. 1 の A の位置に、 曲管の場合には B の位置に供試管を取り付けて試験を行う。一過式の場合は循環させず常に新し い溶液を供給し続ける必要があるため莫大な試験溶液および廃液の問題が発生する。そのため、 実機の循環ラインに配管を増設する等の特殊な条件を除いて現実的ではない。これらの装置にお いて損傷が固体粒子によるエロージョンになるための条件は、供試管の上流端に不連続がないこ と、流速は数m/s 程度でせん断力が大きくないことが挙げられている<sup>[17]</sup>。供試管が鋼である場合 は錆が発生するため、循環式配管法ではループ中に錆を除去するためのろ過タンクを設けている 装置も存在する<sup>[18]</sup>。流動型試験装置は実際の循環ラインに近い環境を模擬して配管の構造材料に 生じるエロージョンやエロージョン・コロージョンによる損傷速度を得るには適した方法である と考えられる。

# 2.2 回転型試験装置

粉体内回転法は、Sauffer<sup>[19]</sup>が開発した Fig. 2<sup>[20]</sup>に示すような装置を用いて、試験片を固体粒子 を含んだ溶液中で一定速度で回転させる試験方法である。構造が単純で操作も容易な比較的小型 の装置であるため多くの試験が実施されたが<sup>[2, 20-22]</sup>、固体粒子が軽く試験片の回転速度が速い場 合にエロージョンによる浸食量が著しく少ないという問題点も明らかになった<sup>[2]</sup>。これは試験片 の回転によって生じる溶液の流れの影響で固体粒子も試料と同じ方向に回ってしまうため<sup>[17]</sup>、試 験片と固体粒子の相対速度が小さくなるために生じたと考えられる。すなわち、粉体内回転法は 構造材料の寿命予測に必要な損傷速度を調査するには適さないが、構造が簡単で操作も易しいた め相対的な比較による構造材料の選定には有用な試験法である。

# 2.3 噴流型試験装置

# 2.3.1 すきま噴流法

噴流型試験装置の一つであるすき間噴流法は、流動型や回転型では定量的に評価しにくかった 固体粒子によるエロージョンの損傷速度に及ぼす固体粒子の性状や粒子の衝突条件を評価するた めに岡ら<sup>[23]</sup>が開発した試験装置である。Fig. 3<sup>[23]</sup>にすきま噴流法サンドエロージョン試験装置の概 略図を示す。この装置では、固体粒子が液槽の下部に沈降するようにできているため、液槽上部 には固体粒子のない上澄液が存在する。上澄液はポンプによって液槽下部のノズル (Fig. 3 (a)④の 下部)と試験部のノズル (Fig. 3(a) ①および Fig. 3 (b)③)に送られる。固体粒子を含む溶液に浸 漬されている試験部では、中央のノズルから上澄液が噴出されることによって周囲から固体粒子 が取り込まれて混合し、すき間部を放射状に固液二相流が流出する。試験部に衝突する固液二相 流中の固体粒子の占める割合は、液槽下部のノズルへ送る液量の調整によって変化させることが できると報告されている。このすき間噴流法によって、金属材料のエロージョンに及ぼす固体粒 子の形状の影響や、粒径の影響、固体粒子濃度の影響を定量的に評価することが可能となり<sup>[23]</sup>、 腐食性の溶液を用いることでエロージョン・コロージョンの試験にも適用可能であることがわか っている<sup>[17]</sup>。

# 2.3.2 上昇噴流法

固体粒子のエロージョンによる損傷速度に及ぼす固体粒子の各種パラメータの影響に関して、 定量的な評価を可能にしたすき間噴流法であったが、固体粒子の衝突角度依存性については評価 ができなかった。そこで岡ら<sup>[24]</sup>は、すき間噴流法を改造して粒子衝突角度を制御できる上昇噴流 装置を開発した。Fig. 4<sup>[24]</sup>に上昇噴流法試験装置の模式図を示す。装置は上下に直径の異なる液槽 と中央に位置する試験部から構成される。上昇噴流法では、すき間噴流法とは異なり試験部上部 (Ejector)からの吸引によって液槽下部から固体粒子を含んだ溶液を吸引して試験片に衝突させて いる。固体粒子の衝突速度は、試験部下部にあるノズルの径を変えることで調整できる。固体粒 子の衝突角度は、試験片のホルダーを回転させることによって任意のものに設定することが出来 る。

以上のように、噴流型の両試験装置は固液二相流による金属材料の損傷に及ぼす各種パラメー タの影響を定量的に調査するには有用である。



Fig.1 Schematic representation of a test loop (参考文献 15 を基に作成)



Fig. 2 Schematic representation of a rotating erosion testing apparatus<sup>[20]</sup>



Fig. 3 (a) Schematic representation of a jet-in-slit testing apparatus 1. Test Section, 2. Fluidized-bed,
3. Settling separator, 4. Distributor, 5. Pump, 6. Venturi, 7. Heater, 8. Valve (b) Test section 1. Specimen,
2. Guide plate, 3. Nozzle<sup>[23]</sup>



Fig. 4 Schematic representation of fountain-jet testing apparatus<sup>[24]</sup>

# 3. 固液二相流によるエロージョン

固液二相流に含まれる固体粒子が、任意の速度や角度をもって金属材料表面に衝突し材料を変 形させることを本報ではエロージョンとする。一般に、固体粒子の速度が最低でも 1~2 m/s 程度 で衝突した場合ほとんどの材料は損傷することが知られている<sup>[25]</sup>。以下で固液二相流によるエロ ージョンにより生じる損傷速度に及ぼす各種パラメータの影響について説明する。

## **3.1 衝突速度の影響**

礒本ら<sup>[26]</sup>は、噴流型サンドエロージョン試験装置を用いて、アルミニウム試験片に固体粒子を 約 40 - 120 m/s の速度で衝突させた試験を実施し、Fig. 5<sup>[26]</sup>のように固体粒子の衝突速度と試料の へこみ率(δ/R)の関係を示した。へこみ率という指標はエロージョンによる損傷速度と相関があ る。Fig.5 より、へこみ率が 0.3 以下の範囲では、へこみ率と衝突速度には線形比例の関係がある ことがわかる。礒本らは、噴流型サンドエロージョン試験装置を用いて、衝突角度や衝突速度を 変化させて、炭素鋼に SiC 粒子を衝突させる実験<sup>[3]</sup>を実施し、エロージョンによる損傷速度はす べての角度において衝突速度が増加するに従って増大することを示している(速度範囲 71 – 116 m/s)。Levy ら<sup>[21]</sup>は、回転型試験装置により軟鋼(A53)およびステンレス鋼(304SS)に微粉炭を 衝突速度を変化させて衝突させる試験を実施し、どちらの金属でもエロージョンによる損傷速度 が衝突速度の増大に伴って大きくなることを報告した(速度範囲 3 – 15 m/s)。このように、多く の金属材料で、広い衝突速度範囲において、エロージョンによる損傷速度が衝突速度に伴って大きくなることがわかる。

## **3.2 衝突角度の影響**

エロージョンによる損傷速度と固体粒子の衝突角度の関係を Fig. 6<sup>[25]</sup>に示す。Fig. 6 より固体粒 子の金属材料表面への衝突角度によっては、切削作用が適用される場合と塑性変形による作用が 適用される場合がある。また、浅い角度での衝突で生じる切削エロージョンに伴う損傷速度の方 が、深い角度での衝突による塑性変形の損傷速度に比べて大きいことがわかる。Bitter<sup>[27,28]</sup>は、浅 い角度における切削によるエロージョン量を W<sub>C</sub>、深い角度における塑性変形によるエロージョ ン量を W<sub>D</sub>、それぞれの和である W を全体のエロージョン量として、式1のように提案した。

## $W=W_D+W_C$ (1)

この式は簡易で理解しやすいことから、エロージョン量の衝突角度依存性を示す基礎式として一般に用いられている。岡らは<sup>[29,30]</sup>この式を発展させた材料の硬さの項を加えた式も提案している。

固体粒子の衝突角度が、完全に塑性変形する 90°の場合と、切削作用によるエロージョン量が 最大となる 30°の場合では、損傷速度に最大で約 2 倍の差が生じると報告されている<sup>[3]</sup>。このた め、衝突角度は損傷速度に大きな影響を及ぼすパラメータである。

## 3.3 粒子形状の影響

岡ら<sup>[23]</sup>は、粒径が等しいガラスパウダー、ガラスビーズの2種類の形状が異なる粒子を、固液 二相流中の固体粒子濃度が同一になるように添加して作製した2種類の溶液を用いて、ステンレ ス鋼(SUS316L)のエロージョンによる損傷速度に及ぼす粒子形状の影響についてすき間噴流法 で調査した。Fig.7に損傷による質量減少量と試験時間の関係を示した。これより、ガラスパウダ ーに比べてガラスビーズの損傷速度は極端に小さいことがわかる。これは、ガラスパウダーが鋭 角の部位を持っているのに対して、ガラスビーズは球状であることが起因していると考えられる。 下田ら<sup>[31]</sup>は、衝突条件を揃えて不定形のスチールグリッドと球形のスチールショットをアルミニ ウムに衝突させる試験を実施した。その結果、それぞれの固形粒子で粒径に依らず不定形のスチ ールグリッドが大きいエロージョン量を示すことを明らかにした。このように、衝突する固体粒 子の形状が異なる場合、損傷速度が最大で 100 倍以上になる場合もあるため、固液二相流の試験 で粒子を選定する際は、その形状に留意する必要がある。

# 3.4 粒子径、粒子硬さ、粒子濃度の影響

岡ら<sup>[23]</sup>は、固液二相流中の固体粒子の粒子径と損傷速度の関係をすき間噴流法を用いてステン レス鋼(SUS316)に粒径の異なるコニカル珪砂を衝突させて調査した。その結果、Fig. 8 に示す ように、粒径が増大するに従って損傷速度が増大すること、粒径が約 200 μm を超えると粒径に関 係なくほぼ一定の損傷速度になることがわかった。粒径が約 200 μm を超えると一定の損傷速度 に収束する傾向は、他の研究の結果<sup>[1,32]</sup>ともよく一致している。

下田ら<sup>[31]</sup>は、AI 合金に硬さの異なるステールショット粒子を衝突させる試験を実施した。その 結果、ステールショット粒子の粒径が同一の場合には、粒子が硬いほどエロージョンによる損傷 速度が増大することを報告している。

Ives ら<sup>[33]</sup>は、固液二相流中に含まれるアルミナ粒子の衝突粒子濃度を変化させた試験を実施し、 衝突角度が 20、60°、衝突速度 20、60 m/s の条件で銅のエロージョンによる損傷速度が、アルミ ナ粒子の衝突濃度が増大するに伴って大きくなることを明らかにした。Mills ら<sup>[34]</sup>による実験にお いても、金属材料のエロージョンによる損傷速度は衝突粒子数に線形比例すると報告されている。

## 3.5 鋼材のクロム含有量の影響

岩渕ら<sup>[35]</sup>は、固液二相流による鋼材の損傷速度に及ぼす合金組成の影響について、特にクロム 含有量に着目し回転型試験装置を用いて調査している。Fig. 9 に損傷による質量減少割合と合金 組成中のクロム含有率(wt%)の関係を示した。この図から、クロム含有量が増加すると固液二相流 による鋼材の損傷速度は減少することがわかる。クロム含有量が 0.83 wt%の場合の損傷速度は、 クロムを含有しない鋼材に比べて 40%減少したのに対して、11.75 wt%の添加では損傷速度は 52% 減少している。このことは、固液二相流による鋼材の損傷速度は、1 wt%以下のクロムの添加によ って大きく減少すること、エロージョン耐性を向上させるために 10 wt%を超えるクロム量を鋼材 に添加したとしても効果は変わらないことを示している。

#### 3.6 温度の影響

Levy ら<sup>[21]</sup>は、軟鋼 (A53) およびステンレス鋼 (304SS) に対して試験温度を 25℃から 175℃ま での範囲で変化させて微粉炭を衝突させる試験を回転型試験装置を用いて実施し、どちらの金属 でもエロージョンによる金属材料の損傷速度が温度の増大に伴って大きくなることを明らかにし た。一方で、軟鋼およびステンレス鋼の損傷速度の違いは 25℃と 95℃の温度範囲で 10%以下で あるため、その他の因子に比べるとエロージョンへの影響は少ないと考えられる。



Fig. 5 Relation between indentation depth ratio and impact velocity (参考文献 26 を基に作成)



Fig. 6 Relationship between erosion damage and impact angle<sup>[25]</sup>



Fig. 7 Effect of particle shape on weight-loss of stainless steel by erosion



Fig. 8 Effect of particle size on weight loss of stainless steel by erosion



Fig. 9 Effect of Cr concentration of steel on erosion loss of steel

# 4. 固液二相流によるエロージョン・コロージョン

固液二相流による金属材料のエロージョン・コロージョンについて、損傷速度に及ぼす各パラ メータの影響を説明する。

# 4.1 衝突速度とpHの影響

梅村ら<sup>[20]</sup>は、固体粒子と腐食性溶液で構成された固液二相流中における炭素鋼の損傷速度につ いて pH および固体粒子の衝突速度の影響をすき間噴流法を用いて調査した。Fig. 10 は梅村らの 調査結果<sup>[20]</sup>を速度(a)と pH(b)で整理したグラフである。腐食性溶液は硫酸の添加によって調整さ れたため、pH が低いほど硫酸濃度が高い、いわゆる腐食性の高い溶液である。Fig. 10 (a)の衝突速 度で整理したグラフから、どの pH においても衝突速度の増大に伴って鋼の損傷速度が増大する ことがわかる。一方、pH が低くなると衝突速度の影響は小さくなることがわかる。これは、pH が 低くなると溶液の腐食性が上がることで腐食による鋼の損傷が支配的になったためであると考え られる。Fig. 10 (b)の pH で整理したグラフから、固体粒子の衝突速度が 2 m/s の場合、pH が 7 以 上になると損傷速度が酸性溶液に比べて著しく減少することがわかる。一方、固体粒子の衝突速 度が3m/s以上になるとpHが7以上でも損傷速度は速い。これは衝突速度が速いと腐食ではなく エロージョンによる損傷が支配的になったためであると考えられる。Efird<sup>[36]</sup>や Copson<sup>[37]</sup>は、海水 を腐食性溶液として用いた実験で鋼のエロージョン・コロージョンによる損傷速度に及ぼす固体 粒子の衝突速度の影響を調査した。その結果、腐食が塩化物イオンに起因する場合においても鋼 の損傷速度は衝突速度に伴って大きくなることを報告している。一方、梅村ら<sup>[20]</sup>は、ステンレス 鋼についても Fig. 10 と同様の試験を実施し、炭素鋼と同様に損傷速度は固体粒子の衝突速度に依 存するものの、酸性(pH2)と中性(pH7)の pH 変化による損傷速度の差は無いことを示してい る。これはステンレス鋼の耐食性が高いため、pHの違いによる腐食速度に差が生じなかったこと に起因すると考えられる。pH7における炭素鋼とステンレス鋼の損傷速度は、固体粒子の衝突速 度が 3 m/s 以上の場合ではほとんど変わらないが、衝突速度が 1.5 m/s になるとステンレス鋼の損 傷速度は炭素鋼の 1/2 以下となっていた<sup>[20]</sup>。このことは、衝突速度の低い固液二相流の環境にお いては、耐食性の高い合金材料を使用することでエロージョン・コロージョンによる損傷を抑制 できることを示唆している。

# 4.2 衝突角度と pH の影響

岡ら<sup>[24]</sup>は、噴流型サンドエロージョン装置および pH が 2、4、12 の 3 種類の腐食性溶液を用い て、固体粒子の衝突角度および pH が固液二相流による鉄の損傷速度に及ぼす影響について調査 した。Fig. 11 に示した結果から、Fig. 6 のエロージョンのみの場合と同様にどの溶液でも浅い角度 で損傷速度が最大値となり、衝突角度が増大するに従ってその損傷速度は漸減していることがわ かる。溶液が酸性 (pH2) の場合の損傷速度は、他の pH の溶液に比べて速い。酸性溶液で得られ たグラフの形状は他の溶液と同じであるため、コロージョンによって加速される損傷速度はどの 角度でも同程度であったと示唆される。溶液の pH が 4 と 12 の場合の損傷速度はどの角度でもほ ぼ同じである。一方、鉄は pH12 の塩基性溶液中で不動態化し腐食速度は遅くなるため、塩基性溶 液中の損傷速度は単純にエロージョンおよびコロージョンによる各損傷速度の和で考えると pH4 より小さくなるはずである。塩基性溶液中で予想よりも損傷速度が速くなったのは、エロージョ ンとコロージョンの相乗効果により更に生じる損傷が塩基性溶液中で顕著になったためであると 岡ら<sup>[24]</sup>は報告している。このようにエロージョン・コロージョンによる損傷速度は、単純にエロ ージョンによる損傷とコロージョンによる損傷の和では求められないことがわかった。

# 4.3 塩化物イオン濃度の影響(FAC)

固液二相流中における金属材料の損傷速度に及ぼす塩化物イオン濃度や温度、材料のクロム含 有量の影響に関する研究は無い。しかしながら、固液二相流中における損傷速度を考える上でこ れらは重要な因子である。固体粒子を含まない流体で実施された FAC の損傷速度に及ぼす塩化物 イオン濃度および温度、クロム含有量の影響に関する研究は、固液二相流中エロージョン・コロ ージョンを考える上で参考になる知見と考えられる。そのため、本報ではこれらについても併せ て説明する。

木下ら<sup>[18]</sup>は、流れのある環境における鉄の腐食速度に及ぼす塩化物イオン濃度の影響を、流動 型腐食試験装置を用いて調査し、Fig. 12 のような結果を得た。Fig. 12 は流速と腐食速度の関係を 示したもので、グラフ中の各ラインは各塩化物イオン濃度における腐食速度を示したものである。 淡水に近い塩化物イオン濃度 25 ppm においては流速 0.5 m/s で腐食速度が最大となるが、そこか ら流速が速くなるにしたがって、腐食速度は減少することが示されている。これは流速の増大に よって、酸素の供給速度が増大し鉄表面の不動態化および再不動態化が促進されたためであると 考えられている<sup>[18]</sup>。塩化物イオン濃度が 2000 ppm の場合、10 m/s 以上の速い流速でも腐食速度は 25 ppm に比べて大きくなっているが、これは塩化物イオン濃度の増加が不動態皮膜の破壊を促進 するため酸素供給速度の増加に伴い不動態化が抑制されたためだと考えられる。塩化物イオン濃 度が 12000 ppm の場合、これまでの溶液とは異なり流速の増大に伴って腐食速度が漸増している。 これは、高濃度の塩化物イオンによる不動態被膜の破壊が酸素供給量の増大による不動態化およ び再不動態化の促進よりも支配的になったためであると考えられ、酸素供給量の増加が酸素還元 反応を促進して、全体の腐食速度を加速させたことに起因するものと考えられる。

## 4.4 温度の影響 (FAC)

藤原ら<sup>[38]</sup>は、流れのある環境における鉄の腐食に及ぼす温度の影響を、 $25-250^{\circ}$ Cの範囲で計算 的手法を用いて調査した。その結果、およそ 130°Cで腐食速度が最大になることを報告している。 これは Heitmann<sup>[39]</sup>や Bignold ら<sup>[40]</sup>が、実験により流れのある環境における炭素鋼の腐食速度が 130  $-150^{\circ}$ Cで最大になることを示した結果とよく一致している。このことは、流れのある環境におけ る  $0-130^{\circ}$ Cの範囲では、温度が増大するほど鉄の腐食速度も増大することを示唆している。

# 4.5 クロム含有量の影響(FAC)

鉄鋼材料中へのわずかなクロムの添加により流れ加速型腐食速度を抑制することは比較的よく 知られている。また、中性溶液、アルカリ溶液ともに1 wt%以下のクロムを添加することで FAC 速度を一桁以上低下させることができるとの報告もある<sup>[41]</sup>。山田ら<sup>[42]</sup>は、流れのある環境におけ る配管の減肉速度と、クロム含有量(含有量範囲:0.01-0.1%)の関係を実機の PWR2 次系配管 に取り付けられた供試管を調査し、0.1%以下という微量な範囲においてもクロム含有量が増加す るに伴って減肉速度が減少する傾向があることを示した。



Fig. 10 Influence of velocity on erosion-corrosion rate of carbon steel in various pH solution



Fig. 11 Influence of impact angle on erosion-corrosion rate of iron in various pH solution (参考文献 24 を基に作成)



Fig. 12 Effect of flow speed on corrosion rate of carbon steel in solution which has various Cl<sup>-</sup> concentration

## 5. おわりに

固液二相流中における金属材料のエロージョンおよびエロージョン・コロージョンに関する文 献の調査を行った。調査の結果、これらの現象による金属材料の損傷速度は、静止水中の腐食に 比べて極めて多様な因子の影響を受けて変化することがわかった。特に、エロージョンには、衝 突速度や衝突角度、粒子の形状、硬さ、粒子径および材料のクロム含有量が、エロージョンには、 「空速度や衝突角度、溶液のpHなどの腐食性が、金属材料の損傷速度に大きく 影響していた。以上のような固液二相流による金属材料の損傷に影響を与える因子は、逆説的に は適切に条件を変化させることで金属材料のエロージョン・コロージョンを抑制できる因子であ るともいえる。文献調査を通じて、エロージョンや FAC による鋼材の減肉速度はクロム含有量が 1 wt%以下の微量な場合でも無添加の場合に比べて大きく減少すること及び、エロージョン・コロ ージョンによるステンレス鋼の損傷速度は減少することがわかった。

本調査の結果、1Fのデブリ取り出し時に設置される冷却系配管の材料については、クロムを含 む鋼材や耐食性の高いステンレス鋼の使用が望ましいと考えられる。また、エロージョン・コロ ージョンの解析では、誤った条件や曖昧な条件で試験を実施すると金属材料の損傷速度の変化に 影響する因子が適格に判別できない可能性があり、事実と異なる認識をしてしまう危険性がある ことも分かった。このため、1Fのデブリ取り出し時において発生すると予測される粉砕微粒子に ついては配管等の機器材料に与える影響を正確に評価するために、金属材料の損傷速度に大きく 影響を与える環境条件や 1F 特有の放射線によるラジオリシス等の影響を考慮した上で試験を行 う必要がある。

#### 参考文献

- 1. 松村昌信, 岡良則, 畑中宏計, 山脇正昭, 磁歪振動法サンドエロージョン試験装置, 防食技術, 29, 1, 1980, pp.13-18.
- 2. 松村昌信, 岡良則, 畑中宏計, 山脇正昭, エロージョン・コロージョン試験法, 防食技術, 29, 2, 1980, pp.65-69.
- 3. 礒本良則, 西村美由喜, 永橋和雄, 松村昌信, 金属材料における固体粒子衝突エロージョン 量の衝突角度依存性, 材料と環境, 48, 6, 1999, pp.355-361.
- 4. 永橋和雄,松村昌信,礒本良則,球形粒子の準静的および動的押込みによる材料の変形挙動 一固体粒子衝突エロージョンの基礎的解析 I--,材料と環境,51,5,2002, pp.209-214.
- 5. 矢吹彰広, 松脇和雄, 松村昌信, 金属材料の固体粒子衝突エロージョンにおける臨界衝突速度, 材料と環境, 47, 8, 1998, pp.540-547.
- 6. 梅村文夫,松倉伸二,川本輝明,炭素鋼とステンレス鋼のエロージョン・コロージョンに関する電気化学的考察,防食技術,36,10,1987, pp.627-635.
- 7. 松村昌信, エロージョン・コロージョン, 防食技術, 26, 9, 1977, pp.527-537.
- 8. 宮坂松甫, 杉山憲一, 野口学, 八鍬浩, 流体機械・環境装置のエロージョン・コロージョン, 材料と環境, 57, 3, 2008, pp.111-117.

- 9. 小林英男, エロージョン/コロージョンの損傷事故と解析, 材料と環境, 57, 1, 2008, pp.5-8.
- 10. 岡良則,小笠原徹,山脇正昭,松村昌信,磁歪振動法試験装置における工業用純鉄のスラリ ーエロージョン・コロージョン,防食技術,35,4,1986,pp.223-229.
- 11. 岡良則, 香西弘之, 松村昌信, エロージョンとコロージョンの相互作用機構, 防食技術, 35, 1986, pp.320-326.
- 12. 東京電力ホールディングス, 燃料デブリ取り出しの状況, https://www4.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/index-j.html, (参照: 2019年1月29日).
- G. L. Bignold, K. Garbett, R. Garnsey, I. S. Woolsey, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 2
   1. Erosion-corrosion in nuclear steam generators, 2. international conference on water chemistry of nuclear reactor systems, Bournemouth, UK, 1980, pp.14-17
- 14. 末沢慶忠, 酸性流動液による鋼の腐食, 化学工学, 27, 10, 1963, pp.694-702.
- 15. 末沢慶忠, 篠原孝順, 山口雅靖, 酸性流動液による鋳鉄管の腐食, 化学工学, 31, 2, 1967, pp.171-177.
- 16. 小玉俊明, 藤井哲雄, 馬場晴雄, 亜鉛めっき層の腐食生成物および耐食性と淡水水質の関係, 防食技術, 29, 11, 1980, pp.551-557.
- 17. 松村昌信, 動的環境下の腐食試験法, 防食技術, 30, 5, 1981, pp.285-291.
- 18. 木下和夫, 市川克弘, 北嶋宣光, 塩素イオンを含む流動水中におけるポンプ用材料の腐食, 防食技術, 32, 1, 1983, pp.31-36.
- 19. W. A. Stauffer, Wear of Metals by Sand Erosion, Metal progress, 67, 1, 1956, pp.102-107.
- 20. 梅村文夫, 川本輝明, エロージョン・コロージョン速度に及ぼす流速, pH, 試験方法の影響, 防食技術, 34, 3, 1985, pp.175-183.
- 21. A. V. Levy, G. Hickey, Liquid-solid particle slurry erosion of steels, Wear, 117, 2, 1987, pp.129-146.
- 22. W. Dawihl, G. Altmeyer, Grundlagen des verschleisses hochharter werkstoffe, Wear, 32, 3, 1975, pp.291-308.
- 23. 岡良則, 松村昌信, 畑中宏計, 山脇正昭, すき間噴流法サンドエロージョン試験装置, 防食 技術, 30, 10, 1981, pp.574-579.
- 24. 岡良則,山脇正昭,松村昌信,エロージョンとコロージョンの相乗効果量の粒子衝突角度依存性,防食技術, 35, 5, 1986, pp.270-275.
- 25. 礒本良則, エロージョンからエロージョン・コロージョン, 材料と環境, 57, 1, 2008, pp.15-21.
- 26. 礒本良則, 西村美由喜, 松村昌信, 噴流型サンドエロージョン試験装置における粒子衝突条 件の検討, 材料と環境, 48, 6, 1999, pp.349-354.
- 27. J. G. A. Bitter, A study of erosion phenomena part I, Wear, 6, 1, 1963, pp.5-21.
- 28. J. G. A. Bitter, A study of erosion phenomena Part II, Wear, 6, 3, 1963, pp.169-190.
- Y. I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation, Wear, 259, 1-6, 2005, pp.95-101.
- Y. I. Oka, T. Yoshida, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage, Wear, 259, 1-6, 2005,

pp.102-109.

- 31. 下田潔, 白丸信彦, 湯川隆男, エロージョンに及ぼす珪砂, ガラス及びスチール粒子径の影響, 材料科学, 22, 1986, pp.330-336.
- 32. G. P. Tilly, A two stage mechanism of ductile erosion, Wear, 23, 1, 1973, pp.87-96.
- L.K Ives, A.W. Ruff, Erosion: Prevention and Useful Application, ASTM Spec. Tech. Publ. 664, 1978, pp.5-35.
- 34. D. Mills, J. S. Mason, Particle size effects in bend erosion, Wear, 44, 1977, pp.311-328.
- 35. 岩渕義孝,小林勲,竹之内朋夫,波多野隆司,鉄鋼材料のサンドエロージョン特性に及ぼす ミクロ組織と硬さの影響,鋳物,64,4,1992, pp.273-278.
- K. D. Effrd, Effect of Fluid Dynamics on the Corrosion of Copper-Base Alloys in Sea Water, Corrosion, 33, 1977, pp.3-8.
- 37. H. R. Copson, Effects of Velocity on Corrosion, Corrosion, 16, 1960, pp.130-136.
- 38. K. Fujiwara, M. Domae, K. Yoneda, F. Inada, T. Ohira, K. Hisamune, Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility, Nucl. Eng. Des., 241, 2011, pp.4482-4486.
- H. G. Heitmann, P. Schub, Initial Experience Gained with a High pH Value in the Secondary System of PWRs, Proc. of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, British Nuclear Engineering Society, London, 1983, pp.243-252.
- G. J. Bignold, K. L. Garbett, R. Garnsey, I. S. Woolsey, 1980. Erosion-corrosion in nuclear steam generators. Proc. 2nd meeting on water chemistry of nuclear reactors., British Nuclear Engineering Society, London, pp.5-18.
- 41. 日本原子力学会編, 原子炉水化学ハンドブック, コロナ社, 2000.
- 42. 山田卓陽, 戸塚信夫, 流れ加速型腐食速度に及ぼすクロム含有量, 硬さ, 金属組織の影響-実機取り替え配管からの検討-, INSS JOURNAL, 15, 2008, pp.217-224.

This is a blank page.

\_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本ì	単位		
本平里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例			
AI 立長 SI 組立単位				
名称	記号			
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>			
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$			
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>			
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>			
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>			
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>			
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m			
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>			
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>			
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>			
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1			
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

# 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの				
名称 記号		記号	SI 単位で表される数値	
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
/3	Ц		9			(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$