JAEA-Research 2008-118



硫化物を含む人工海水における純銅の 応力腐食割れ挙動に及ぼす電位と材質の影響

Effect of Electrode Potential and Material Grade on the Behavior of Stress Corrosion Cracking of Pure Copper in Synthetic Seawater Containing Sulfide

> 谷口 直樹 川崎 学 内藤 守正 Naoki TANIGUCHI, Manabu KAWASAKI and Morimasa NAITOU

> > 地層処分研究開発部門 ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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 Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

JAEA-Research 2008-118

硫化物を含む人工海水における純銅の応力腐食割れ挙動に及ぼす電位と材質の影響

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

谷口 直樹+、川崎 学*、内藤 守正

(2008年12月19日受理)

一般に、純銅は酸素を含まない天然水環境で熱力学的に安定であり、水の還元による腐食はほ とんど進展しないと考えられる。しかし、硫化物を含む環境では熱力学的な安定性を失って硫化 銅として腐食し、条件によっては応力腐食割れ(SCC)に対して感受性を示す。本研究では、硫化ナ トリウムを含む人工海水中において純銅の低歪速度試験を実施し、応力腐食割れ感受性に及ぼす 電位、材質の影響を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 低酸素濃度下での自然電位より+300mV 貴な電位条件までは応力腐食割れ感受性は小さくな る傾向があった。しかし、自然電位より数 100mV を大きく超えるような電位条件では、応力 腐食割れ感受性は再び高くなる可能性が示唆された。
- 2) リン脱酸銅と無酸素銅を比べると、無酸素銅のほうが亀裂は発生しやすい傾向が認められた が、引張強さ、全伸びなど機械的特性に違いはなかった。
- 3) 緩衝材共存下での SSRT を行うため、試験片に装着する試験カラムを作成した。これを用い たリン脱酸銅に対する試験の結果、Na₂S 濃度 0.001M、-420mV vs. SCE(窒素雰囲気での自然 電位に相当)において応力腐食割れの発生は認められなかった。

核燃料サイクル工学研究所(駐在):〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 +環境技術管理部処分技術課兼務 ※技術開発協力員:環境技術管理部処分技術課兼務

JAEA-Research 2008-118

Effect of Electrode Potential and Material Grade on the Behavior of Stress Corrosion Cracking of Pure Copper in Synthetic Seawater Containing Sulfide

Naoki TANIGUCHI⁺, Manabu KAWASAKI^{*} and Morimasa NAITOU

Geological Isolation Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 19, 2008)

In general, copper is thermodynamically stable under anaerobic condition, so that corrosion due to water reduction hardly propagate on copper. However, in the presence of sulfide, copper loses its thermodynamical stability and corrodes as copper sulfide, and is susceptible to stress corrosion cracking (SCC) depending on environmental condition. In this study, slow strain rate tests (SSRT) were performed in synthetic sea water containing sodium sulfide and the effect of electrode potential and the difference of material grade were examined. The results were summarized as follows;

- The SCC susceptibilities tend to be lowered with increasing the electrode potentials up to +300mV above corrosion potential in nitrogen atmosphere. However, it was indicated that the SCC susceptibility at nobler potential far over +300mV above corrosion potential were raised again.
- 2) In comparison of oxygen free copper and phosphorous deoxidized copper, the former tended to be allowed to crack initiation more readily, but the mechanical properties such as tensile strength and elongation were almost equal in both materials.
- 3) In order to apply the SSRT with buffer material, a test column attached to a specimen was developed. As the result of SSRT of phosphorous deoxidized copper using the column, no SCC was observed in 0.001M-Na₂S at -420mV vs SCE, which is the corrosion potential in buffer material under anaerobic condition (nitrogen atmosphere).

Keywords: Copper, Overpack, Sulfide, Stress Corrosion Cracking

⁺ Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department (additional post)

X Collaborating Engineer: Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department (additional post)

目 次

1.	はじめに		1
2.	実験方法		3
3.	実験結果と考察	1	0
4.	おわりに	32	2
参え	考文献	3	3

Contents

1.	Introduction1
2.	Experiments3
3.	Results and Discussions10
4.	Summary32
Re	ferences33

This is a blank page.

1. はじめに

純銅は高レベル放射性廃棄物処分におけるオーバーパック候補材料のひとつとして検討されて いる¹⁾。銅は一般的に図 1.1 の電位・pH 図に示すように、Cu/Cu₂O の平衡電位が H₂/H₂O (P_{H2}=1atm)の平衡電位より十分に貴であり²⁾、貴金属的な性質を有する金属といえる。酸素が なく閉鎖系の条件であれば、腐食反応は、銅イオン濃度、水素分圧など速やかに平衡条件に達し、 それ以降は進展しないと考えられる。オーバーパックの置かれる環境は完全な閉鎖系とはいえな いものの、緩衝材に覆われているため物質移行が抑制されている。したがって、容易に平衡条件 に近づき、反応生成物の緩衝材中への物質移行によって濃度が平衡条件からずれた分に相当する 量の腐食が進展するのみと考えられる。よって銅をオーバーパック材料として用いた場合には極 めて長い寿命を期待できる可能性がある。しかし、図 1.2 に示すように、ある程度の硫化物を含 む環境では、以下に示す反応の平衡電位(E_{eq})が水素平衡電位以下となり²⁾、貴金属的な性質を失 い、低酸素濃度環境でも、水の還元反応をカソード反応とした腐食が進展し得る。

$$\begin{split} 2Cu + H_2S &= Cu_2S + 2H^+ + 2e^- \text{, } E_{eq} = -0.305 - 0.0591 pH^- \ 0.0295 [H_2S] \\ 2Cu + HS^- &= Cu_2S + H^+ + 2e^- \text{, } E_{eq} = -0.511 - 0.0295 pH^- \ 0.0295 [HS^-] \\ 2Cu + S^{2^-} &= Cu_2S + 2e^- \text{, } E_{eq} = -0.921 - 0.0295 [S^{2^-}] \end{split}$$

したがって、硫化物共存の可能性がある環境条件では銅の腐食形態、腐食速度を明らかにする ことが課題となる。純銅を処分容器候補材料として検討しているスウェーデン、フィンランドで は、地下水中の硫化物濃度が極めて低い環境を想定しており、処分容器に 100 万年を超える寿命 を期待している⁴⁾。わが国の地下水中における硫化物濃度は実測値として 10⁻⁴M 以下とされてい などにより還元されてより高い硫化物濃度条件になる場合も否定できないことなど、環境条件の 不確実性を考慮して、地下水中で実測されている濃度よりも高い濃度条件を含めて検討を行って きた 677。これまで、低酸素濃度環境下、人工海水中における純銅の腐食挙動に及ぼす硫化物濃度 の影響を検討し、硫化物濃度が 0.001M 以下であれば 1000 年間の腐食量は無視できるほど小さ く、低歪速度試験(Slow Strain Rate Test、以下 SSRT)では応力腐食割れ感受性を示さなかっ たことから、このような環境条件で銅オーバーパックは 1000 年を大きく超える寿命を期待でき る可能性が示唆された ⁷⁾。しかし、応力腐食割れ感受性は硫化物濃度だけでなく種々の条件によ る影響を受ける場合があり、材料因子、環境因子等による影響を明らかにする必要がある。一般 に応力腐食割れは進展速度が数 mm/y 以上に及ぶ場合があり³⁾、現実的な腐食しろの設定は困難 であることから、種々の因子に対して発生条件を明らかにし、応力腐食割れを起こさない条件の 組み合わせで銅オーバーパックを使用することが基本的な考え方となる。

材料因子による影響としては、材料中成分や純度の影響、溶接など熱履歴の影響、金属組織の 影響などが挙げられる。環境因子の影響として、塩化物イオンや炭酸水素イオンなどの共存化学 種の濃度、pH、電位、温度などが挙げられる。本研究では、前報 [¬]に引き続き Na₂S を添加した 人工海水を試験溶液に選定し、材料因子の影響としてまず純銅の材質の違いに着目してリン脱酸 銅と無酸素銅の2種類を用い、応力腐食割れ感受性の違いを比較した。また、環境因子の影響と して処分環境条件の酸化還元性の変化による影響に着目し、電極電位による応力腐食割れ感受性 への影響を調べた。更に、緩衝材共存下での応力腐食割れ挙動を調べるため、緩衝材を充填して SSRT 用の試験片に装着するカラムを制作し、実際に SSRT を行った。



図 1.2 Cu-S-H₂0 系における電位-pH 図 (Garrels ら²⁾の熱力学データを用いて作成)

2. 実験方法

2.1 試験片

純銅試験片の材質は無酸素銅およびリン脱酸銅とした。成分の分析値を表 2.1 に示す。図 2.1 に試験片の形状、寸法を示す。試験片の形状・寸法は JIS Z2201 14B 試験片に準拠した。試験片の表面仕上げについては、全て耐水研磨紙で#800 まで湿式(機械)で研磨し、端面もこれに準じる仕上げとした。次に、エタノールによる脱脂洗浄を行った後、蒸留水で洗浄した。

2.2 緩衝材共存下での試験用カラム

緩衝材中における試験では、試験片に図 2.2 に示すような緩衝材を充填して試験片に装着する 純チタン製カラムを作製した。カラムは上下 2 つの部品より構成され、それぞれ内部に緩衝材を 圧縮成形して充填するスペースがある。また、それぞれの底部には試験溶液を通すための孔があ り、緩衝材底部に敷いたフィルタを介して試験溶液が緩衝材に浸潤する。カラム内に緩衝材を充 填後、試験片を挟む形で試験片へ装着し、ボルトで固定する構造になっている。試験片への装着 状況を図 2.3 に示す。カラムと試験片が接触するおそれのあるカラム端部には、試験片への装着 時にシリコン樹脂を塗布し、絶縁した。

2.3 試験条件

試験溶液は表 2.2 に示す組成の人工海水に硫化ナトリウム・九水和物 (JIS 特級)を添加した溶 液を用いた。硫化ナトリウム濃度は 0.001M と 0.01M とした。試験温度は 80℃、歪速度は前報⁷⁾ に準じ、8.3×10⁻⁷/s(1µm/min)とした。緩衝材共存系での試験では、ベントナイト(クニゲル V1) 70wt%とケイ砂 30%の混合物とし、乾燥密度 1.6g/cm³に圧縮成形した。

試験片の電位については次のように値を設定した。まずあらかじめ窒素雰囲気のグローブボックス内で SSRT と同一の溶液条件で自然電位を測定し、安定後の値を求めた。SSRT ではこの値に 定電位保持した。また、図1.2より、[S(-II)]=[S(VI)]となる電位条件よりも十分貴な値として 自然電位より 700mV 貴な値を設定した。これらの間の電位として、自然電位より 100mV および 300mV 貴な条件でも実施した。緩衝材中の試験も同様に、あらかじめ緩衝材中にリード線付きの 銅試験片を埋め込み、窒素雰囲気下で自然電位測定を行い、その値に定電位保持し SSRT を行っ た。あらかじめ測定した自然電位の値は以下の通りであり、無酸素銅とリン脱酸銅でほぼ同一の 値を示した。

[Na₂S]=0.001M: -880mV vs. SCE

[Na₂S]=0.01M: -950mV vs. SCE

[Na₂S]=0.001M(緩衝材中): -420mV vs.SCE

また、不活性環境でのデータとの比較のため、シリコンオイル中での試験も行った。試験条件 を表 2.3 にまとめて示す。

2.4 試験手順

1) 試験片を電解槽に固定し、低歪速度試験装置に接続した(図 2.4)。なお、試験片と低歪

速度試験装置の接続のための連結金具、連結ピンは試験溶液との接触を避けるため、シリ コンゴム(信越化学工業(株)製RTVゴム,脱オキシムタイプ)でマスキングした。

- 2) 試験溶液約 600mL を電解槽に注ぎ、所定の温度((80℃) まで昇温した。試験溶液中の 硫化物の揮発を抑制するため、窒素ガスの通気は行わなかった。
- 3) ポテンシオスタットを用いて試験片の電位を所定の値に設定し、保持したのち、一定のひずみ速度での引張を開始した。試験中は溶液中の硫化物濃度が徐々に低下するため、約24時間以内ごとに溶液の交換を行った。
- 4) 試験終了後(試験片破断後)、装置を分解して試験片を取り出し、洗浄後、試験後の試験 片の外観を写真撮影した。その後、KCI-HCI 水溶液中で脱スケール処理を行い、破面と側 面の SEM 観察を実施した。

無酸素銅		リン脱酸銅		
成分	濃度 (ppm)	成分	濃度 (ppm)	
Pb	2.0	Pb	1.9	
Zn	<1	Zn	<1	
Bi	<1	Bi	<1	
Cd	<1	Cd	<1	
Hg	<1	Hg	<1	
0	1.7	0	3.0	
Р	<0.5	Р	45	
S	3	S	3	
Se	<1	Se	<1	
Те	<1	Te	<1	
Н	0.4	Н	0.4	

表 2.1 試験片中の不純物濃度

表 2.2 人工海水の組成

成分	濃度 (M)	成分	濃度 (M)
Cl	5.6×10^{-1}	Na ⁺	4.8×10^{-1}
SO_4^{2-}	2.9×10^{-2}	\mathbf{K}^+	1.0×10^{-2}
HCO ₃ ⁻	2.4×10^{-3}	Ca ²⁺	1.0×10^{-2}
F⁻	7.4×10^{-5}	Mg^{2+}	5.5×10^{-2}
Br⁻	8.6x10 ⁻⁴	Sr^{2+}	$7.0 \mathrm{x} 10^{-4}$
BO ₃ ³⁻	4.4×10^{-4}	pН	7.9-8.4

No.	試験片	溶液	Na_2S	電位	備考
			(M)	(mV vs.	
				SCE)	
1	無酸素銅	Si オイル	-	_	
2	無酸素銅	人工海水	0.001	-880	窒素雰囲気での自然電位
3	無酸素銅	人工海水	0.001	-780	窒素雰囲気での自然電位+100mV
4	無酸素銅	人工海水	0.001	-580	窒素雰囲気での自然電位+300mV
5	無酸素銅	人工海水	0.001	-180	窒素雰囲気での自然電位+700mV
6	無酸素銅	人工海水	0.01	-950	窒素雰囲気での自然電位
7	無酸素銅	人工海水	0.01	-850	窒素雰囲気での自然電位+100mV
8	無酸素銅	人工海水	0.01	-650	窒素雰囲気での自然電位+300mV
9	無酸素銅	人工海水	0.01	-250	窒素雰囲気での自然電位+700mV
10	リン脱酸銅	Si オイル			
11	リン脱酸銅	人工海水	0.001	-880	窒素雰囲気での自然電位
12	リン脱酸銅	人工海水	0.001	-780	窒素雰囲気での自然電位+100mV
13	リン脱酸銅	人工海水	0.01	-950	窒素雰囲気での自然電位
14	リン脱酸銅	人工海水	0.01	-850	窒素雰囲気での自然電位+100mV
15	リン脱酸銅	人工海水+	0.001	-420	窒素雰囲気での自然電位
		緩衝材			

表 2.3 SSRT 試験条件

No. 10, 11, 13 は実施済み⁷⁾



図 2.1 試験片の形状・寸法



図 2.2 緩衝材中での SSRT 試験カラム(純チタン製)の形状、寸法

JAEA-Research 2008-118



図 2.3 緩衝材中での試験用カラムの試験片への装着状況 (上段:緩衝材充填後、中段:試験片装着後、下段:試験片装着後側面)



図 2.4 SSRT 試験セルと試験片の接続状況の模式図

実験結果と考察

3.1 試験後試験片の外観

試験後試験片の外観を図 3.1 (無酸素銅)と図 3.2 (リン脱酸銅)に示す。破断部ではいずれも 絞りが認められており、絞りの程度と試験条件との関係は外観上明確ではないが、No.6 では比較 的絞りが小さいように見える。Na₂S を添加した人工海水中での試験片表面は、No.5 を除き、いず れも試験片が黒色~灰色に変化または腐食生成物が付着していた。無酸素銅、リン脱酸銅ともに Na₂S 濃度 0.001M、電位-880mV vs. SCE の条件では (No.2, No.11) わずかに着色または試験片に 薄い皮膜が形成されていた程度であり、試験片の溶解・減肉はほとんどなかったと考えられる。 しかし、電位を自然電位から貴化させた No.3, No.4, No.12 の条件では腐食生成物が自然電位の 場合より厚く付着しており、電位が最も高い No.5 の-180mV vs. SCE では、付着物がはがれ、試験 片素地が露出していた。Na₂S 濃度 0.01M ではいずれの条件も腐食生成物が付着しており、電位が 高い条件ほど厚く成長していたが、電位が最も高い No.9, -250mV vs. SCE では、付着物がはがれ、 試験片素地が一部露出していた。カラムを用いた緩衝材共存系での試験(No.9)では、カラム内の 緩衝材に接していた部分でほぼ均一に溶解が進んでおり、表面は銀色に着色しているものの、腐 食生成物はほとんど付着していなかった。

3.2 応力-歪み線図

各条件で得られた応力-歪み線図を図 3.3 (無酸素銅)、図 3.4 (リン脱酸銅) に示す。また、緩 衝材共存系での結果(リン脱酸銅) は図 3.4(a)中に示した。図 3.3、図 3.4 より、いずれも電位 の貴化とともに最大応力、全伸びともに低下する傾向があった。また、Na₂S 濃度の高いほうが低 下の傾向は大きくなった。ただし、無酸素銅の場合、Na₂S 濃度が 0.01M の条件では-850mV よりも -650mV のほうが全伸びは大きくなった。緩衝材共存系では、最大応力、全伸びともにシリコンオ イル中に比べて明らかに小さくなった。

3.3 SEM 観察結果

図 3.5~図 3.18 に破断面と破断面近傍の側面の SEM 観察結果を示す。代表的な部分については 拡大して観察した結果も示した。各条件での結果は以下のとおり。

(1)シリコンオイル中での結果

不活性環境であるシリコンオイル中の結果を図 3.5 に示す。破面は図 3.5-(a)に代表されるよう に、ディンプル状であり、脆性的な破壊の痕跡は認められなかった。また、側面は変形した部分 で凹凸が大きくなっており、破断部に近い部分ではすべり線と思われる縞状の模様が観察された が、亀裂は認められなかった。

(2) 無酸素銅における Na₂S 濃度 0.001M の結果(図 3.6~図 3.9)

電位-880mV vs. SCE および-180mV vs. SCE の条件では、破面において図 3.6-(b)や図 3.9-(d) に代表されるように、脆性的に破壊した部分が観察されるとともに、側面には明瞭な亀裂が多数 観察された。-180mV vs. SCE では図 3.9-(f)に代表されるように、側面全体に選択的な亀裂または 溶解による亀甲状の様相が認められた。また、-780mV vs. SCE と-580mV vs. SCE では、明瞭な亀 裂とは言いがたいものの、図 3.7-(d), (e) や図 3.8-(d), (e) のように、側面にマクロな亀裂状の溝 やスリットが複数観察された。

(3) 無酸素銅における Na₂S 濃度 0.01M の結果(図 3.10~図 3.13)

電位-950mV vs. SCE では、図 3.10 に示すように側面に多数の亀裂が観察され、図 3.10-(e)に示 すように複数の亀裂が合体したようなより大きな亀裂も認められた。破面においても図 3.10-(a) に代表されるように脆性的に破壊した部分が観察された。-850mV vs. SCE では、図 3.11 に示す ように、破面は溶解が進展して平滑化しているほか、脱スケールで除去できなかった腐食生成物 と思われる粒子が残っており、明瞭ではないが、絞りが比較的小さく、破面の縁には図 3.11-(b) の ように一部脆性的に破壊したように見える部分があった。側面は破断部近傍にマクロな亀裂上の 溝が複数認められ、図 3.11-(d) のように深く内部に進展しているように見えるものと、図 3.11-(e) のように開口部のすぐ下で進展が停止している様子のものがあった。-650mVvs.SCE で は、全体的に溶解が激しく、破面の様相も明確ではないが、図 3.12-(b)に代表されるように脆性 的に破壊した部分もあった。側面には図 3.12-(e)のような亀裂上の窪みは複数認められたものの、 明瞭な割れとは判断できなかった。-250mV vs.SCE では、溶解がさらに進んでおり、破面は平滑 化されていたため明確に判断はできないが、図 3.13-(a)のようなディンプル状の部分と図 3.13-(b)のようなディンプルとは異なる脆性的に破壊したように見える部分が混在していた。 方、側面も全体的に溶解は進んでいたが亀甲状に亀裂または選択的な溶解が生じており、表面の 凹凸は比較的大きくなっていた。

(4) リン脱酸銅における Na₂S 濃度 0.001M の結果(図 3.14~図 3.15)

電位-880mV vs. SCE (図 3.14) の条件については前報⁷⁾にて報告したとおり、破面、側面とも に図 3.6 に見られたような明瞭な亀裂は認められなかったが、側面にすべり線または粒界と思わ れる部分に沿った一部溝状の侵食が認められた。これはその後の断面ミクロ組織観察より⁸⁾、典 型的な開口亀裂とは言いがたく、粒界に沿った選択的な溶解と考えられる。-780mV の場合も図 3.15-(d)に代表されるような破断部近傍に孔食上の窪みが生じているほか、図 3.15-(a), (e)のよ うに側面にすべり線に沿った溶解と思われる縞状の模様は観察されたが、破面、側面ともに割れ や脆性的な破壊の痕跡は認められなかった。

(5) リン脱酸銅における Na₂S 濃度 0.01M の結果(図 3.16~図 3.17)

電位-950mV vs. SCE (図 3.16)の条件については前報⁷⁾にて報告したとおり、破面はやや平滑 化しており、割れの形態が明瞭ではないが、側面には明瞭な亀裂が多数発生しており、その後の 断面ミクロ組織観察より⁸⁾、粒界割れであることが確認されている。-850mV の場合には(図 3.17) 破断面に近い部分で亀裂状の開口した部分やスリット状の浸食は認められたものの、脆性的な破 面や-950mV vs. SCE で観察されたような多数の明瞭な亀裂は生じていなかった。

リン脱酸銅を用いた緩衝材共存系では(図 3.18)、試験片全体的に溶解が進んでおり、選択的 な侵食が平滑化されている可能性はあるが、試験片側面にわずかに粒界と思われる部分での選択 的な侵食が認められたのみであり、脆性的な破面や明瞭な亀裂は認められなかった。 3.4 応力腐食割れ感受性に及ぼす諸因子の影響

上記の結果に基づき、応力腐食割れ感受性に及ぼす電位、材質の影響を検討する。

(1) 電位の影響

無酸素銅を用いて電位をパラメータとした実験結果によると、Na₂S 濃度 0.001M, 0.01M いずれ も一部の結果(0.01M, -650mV vs.SCE)を除いて電位が高いほど引張強さ、全伸びともに低下した (図 3.3、図 3.4)。これら応力-歪み線図から得られた値をオイル中など不活性環境での値と比較 することによって割れ感受性を評価する方法があり ⁹、これら機械的特性値の低下が大きいほど 応力腐食割れ感受性も大きいと判断されるが、本試験では電位が高いほど試験片の溶解・減肉も 進んでおり、見かけ上これらの機械特性が低下していた可能性がある。よって、今回のように試 験片の減肉を伴う条件で得られた応力-歪み線図のみから割れ感受性の電位依存性を評価するこ とは困難である。そこで、SEM 観察結果を考慮して割れ感受性を検討した。Na,S 濃度 0.001M, 0.01M いずれも自然電位では亀裂の発生が明確であるが、電位を自然電位より+100mV、+300mVと貴な値 にすると亀裂は数が少なく、不明瞭になる傾向があった。また、Na2S 濃度 0.01M では自然電位 +100mV(図 3.11)よりも自然電位+300mV(図 3.12)のほうが亀裂は不明瞭である。このような亀裂 発生に対する感受性の違いが応力-歪線図(図 3.3)において-850mV vs.SCE(自然電位+100mV) よりも-650mV vs. SCE(自然電位+300mV)のほうが大きな全伸びを示したことの原因のひとつとし て考えられる。リン脱酸銅の場合も Na₂S 濃度 0.01M の結果を見ると、自然電位では(図 3.16)、 明瞭な亀裂が多数発生していたことに対し、+100mV 貴な条件(図 3.17)では亀裂状の選択的な浸 食が部分的に認められたのみであり、明瞭な亀裂、脆性的な破面は見あたらなかった。したがっ て低酸素濃度下での自然電位より数 100mV 程度貴な電位条件までは応力腐食割れ感受性は小さく なると考えられる。しかし、無酸素銅での自然電位+700mVの電位では再び亀裂が明瞭になる、ま たは亀裂数が増加する傾向があったことから、自然電位より数 100mV を大きく超えるような電位 条件では、応力腐食割れ感受性は比較的高くなる可能性がある。

このような電位による応力腐食割れ挙動の違いの原因は本試験結果のみからは不明であるが、 No.2,5,6,9といった外観上(図3.1参照)腐食生成物皮膜がほとんど形成されていないまたは金 属素地が一部露出した条件で比較的明瞭な亀裂発生が観察されたことから、電位による皮膜形成 過程や皮膜性状への影響が関与している可能性がある。あるいは、電位が貴な値になると、熱力 学的には硫化物,S(-II)よりも硫酸塩,S(VI)が支配的になってくるため、それによる皮膜の性状 の変化、割れ機構の変化などが生じている可能性も考えられる。

(2) 材質の影響

SEM 観察結果によると Na₂S 濃度 0.001M の条件では、-880mV vs. SCE (図 3.6) および -180mV vs. SCE (図 3.9) の電位で無酸素銅には亀裂の発生が認められた一方で、リン脱酸銅にはわずか に粒界に沿った溶解が数ヶ所生じたのみであり、いずれの電位条件でも亀裂は発生していなかった。この SEM 観察結果から判断すると無酸素銅のほうが応力腐食割れ感受性は高いと考えられる。しかし、無酸素銅、リン脱酸銅いずれも-880mV vs. SCE と-780mV vs. SCE の条件では引張強さ、全 伸びともにシリコンオイル中での値と比較してほとんど低下はなく (図 3.3、図 3.4)、これら機

械的特性は不活性環境とほぼ同等である。したがって、無酸素銅における Na₂S 濃度 0.001M、自然電位付近での亀裂の発生は塑性変形が十分すすみ、破断に至る直前に生じた可能性がある。Na₂S 濃度 0.001M の条件では亀裂や粒界に沿った溶解は主に破断部近傍で観察されたことからも、大きく変形した部分で起こりやすかったことが示唆される。以上より、亀裂発生のしやすさの観点からみると Na₂S 濃度 0.001M 程度での応力腐食割れ感受性はリン脱酸銅よりも無酸素銅のほうが高いと考えられるものの、不活性環境との機械的特性の違いは両材料で大きな差はないと考えられる。

Na₂S 濃度 0.01M では、無酸素銅、リン脱酸銅ともに溶解による減肉が無視できないため、応力 - 歪み線図からの評価は困難であるが、シリコンオイル中での全伸びを1としたときの無酸素銅の 伸びは 0.84 (-950mV vs. SCE), 0.72 (-850mV vs. SCE)であり、リン脱酸銅の場合は 0.84 (-950mV vs. SCE), 0.77 (-850mV vs. SCE)となり、大きな違いはない。また、SEM 観察結果においてはいず れの材料も-950mV (図 3.10、図 3.16)では広い領域に多数の亀裂が発生し、-850mV (図 3.11、 図 3.17)では破断部近傍のみに複数の亀裂が発生しており、類似の挙動であったが、無酸素銅の ほうがやや亀裂幅や深さが大きいように見える。

これらをまとめると、リン脱酸銅よりも無酸素銅のほうが応力腐食割れ感受性は高くなる傾向 はあるものの、機械的特性に影響を与えるほど大きな違いはないと考えられる。ただし、亀裂の 発生する応力または歪みの条件などをより詳細に検討する必要がある。また、アンモニア環境な ど純銅に応力腐食割れが生じる条件での応力腐食割れ感受性に及ぼす材質の影響については、P 含有量が大きいほど、また結晶の粒径が大きいほど応力腐食割れ感受性が高いとされている¹⁰。 一方、本試験で用いた無酸素銅とリン脱酸銅ではP濃度のほか、結晶粒径についても後者のほう が大きい¹¹⁾にも関わらず応力腐食割れ感受性についてはアンモニア環境での挙動とは反対の傾 向を示した。P以外の不純物成分は表 2.2 のとおり、0 を除いてほぼ同程度であり、結晶粒径、化 学成分以外の特性についても両者ともにほぼ同等であることが確認されている¹¹⁾。よって硫化物 環境ではPまたは0含有量が応力腐食割れ感受性に影響を及ぼし、これらの成分がアンモニア環 境とは異なる効果をもたらしている可能性がある。

(3) 緩衝材共存下での応力腐食割れ感受性

今回実施した、リン脱酸銅を用いた緩衝材中での自然電位(-420mV vs. SCE)における SSRT 試 験では、応力-歪み線図を、試験溶液中での結果(自然電位、-880mV vs. SCE での結果)と比較す ると(図 3.4)、明らかに引張り強さ、伸びともに低下が認められた。しかし、試験片は全体的に 明らかに溶解が進んでおり、ほとんど減肉していない試験溶液中での結果と比較して評価するこ とは困難である。一方、SEM 観察では(図 3.18)、粒界に沿ったと思われる選択的な溶解が側面に 認められた他は脆性的な破面や亀裂は見当たらず、この条件に関しては応力腐食割れに対する感 受性は示されていないと考えられる。今後、更に幅広い環境・材料の組み合わせに対してデータ を拡充する必要がある。

No.1 シリコンオイル中		
[Na ₂ S]=0.001M	No.2 -880mV vs. SCE	
	No.3 -780mV vs. SCE	
	No.4 -580mV vs. SCE	
	No.5 -180mV vs. SCE	
[Na ₂ S]=0.01M	No.6 -950mV vs. SCE	
	No.7 -850mV vs. SCE	
	No.8 -650mV vs. SCE	
	No.9 -250mV vs. SCE	

図 3.1 SSRT 試験後試験片の外観(無酸素銅)

No.10 シリコンオイル中		ÊO
[Na ₂ S]=0.001M No.11 -880mV vs. SCE		
	No.12 -780mV vs. SCE	
[Na ₂ S]=0.01M	No.13 -950mV vs. SCE	
	No.14 -850mV vs. SCE	
[Na ₂ S]=0.001M 緩衝材中	No.15 -420mV vs. SCE	

図 3.2 SSRT 試験後試験片の外観(リン脱酸銅)



図 3.3 SSRT 試験により得られた応力歪み線図(無酸素銅)



(b) $[Na_2S]=0.01M$

図 3.4 SSRT 試験により得られた応力歪み線図(リン脱酸銅)



破断面



側面

図 3.5 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果(リン脱酸銅、シリコンオイル中)



(無酸素銅、 [Na₂S]=0.001M, 自然電位=-880mV vs. SCE)



図 3.7 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.001M, 自然電位+100mV= -780mV vs.SCE)



図 3.8 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.001M, 自然電位+300mV= -580mV vs.SCE)



図 3.9 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.001M, 自然電位+700mV= -180mV vs.SCE)



図 3.10 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.01M, 自然電位= -950mV vs.SCE)



図 3.11 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.01M, 自然電位+100mV= -850mV vs.SCE)



図 3.12 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.01M, 自然電位+300mV= -650mV vs.SCE)



図 3.13 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (無酸素銅、 [Na₂S]=0.01M, 自然電位+700mV= -250mV vs.SCE)





側面

 $50\,\mu$ m

図 3.14 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (リン脱酸銅、[Na₂S]=0.001M, 自然電位= -880mV vs.SCE)



図 3.15 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (リン脱酸銅、[Na₂S]=0.001M, 自然電位+100mV= -780mV vs.SCE)



図 3.16 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (リン脱酸銅、[Na₂S]=0.01M, 自然電位= -950mV vs.SCE)



図 3.17 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (リン脱酸銅、[Na₂S]=0.01M, 自然電位+100mV= -850mV vs.SCE)



側面

図 3.18 SSRT 試験後試験片の SEM 観察結果 (リン脱酸銅、[Na₂S]=0.001M,緩衝材共存、自然電位=-420mV vs.SCE)

4. おわりに

本研究では、硫化ナトリウムを含む人工海水中において純銅のSSRTによる応力腐食割れ試験を 実施し、電位、材質の影響を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1)低酸素濃度下での自然電位より数 100mV 程度貴な電位条件までは応力腐食割れ感受性は小 さくなる傾向があった。しかし、自然電位より数 100mV を大きく超えるような電位条件では、 応力腐食割れ感受性は再び高くなる可能性が示唆された。
- 2) リン脱酸銅よりも無酸素銅のほうが応力腐食割れ感受性は大きくなる傾向が認められたが、 機械的特性の違いはほとんどなかった。
- 3) 緩衝材を充填して試験片に装着する試験カラムを作成し、緩衝材共存下でのSSRTに適用可能であることを確認した。これを用いたリン脱酸銅に対する試験の結果、Na₂S 濃度 0.001M、-420mV vs. SCE(窒素雰囲気での自然電位に相当)において応力腐食割れの発生は認められなかった。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術"、JNC TN1400 99-022(1999).
- 2) R. M. Garrels and C. L. Christ: Solution, Minerals, and Equilibria, Jones and Bartlett Publishers (1990).
- 3) 腐食防食協会編:材料環境学入門、丸善(1993).
- 4) F. King, L. Ahonen, C. Taxen, U. Vuorinen and L. Werme, :" Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository", SKB Technical Report TR-01-23 (2001).
- 5) M. Yui, H. Sasamoto and R. C. Arthur: Groundwater Evolution modeling for the Second progress Performance Assessment (PA) Report, JNC TN8400 99-030(1999).
- 1) 川崎学、谷口直樹、川上進: "硫化物を含む人工海水中における純銅の腐食挙動評価" JNC TN 8400 2004-027 (2005).
- 7) 谷口直樹、川崎学、内藤守正:"低酸素濃度環境における純銅の腐食挙動に及ぼす硫化物の影響と銅オーバーパック寿命の超長期化の可能性" JAEA-Research 2007-022 (2007).
- N. Taniguchi, M. Kawasaki: Influence of sulfide concentration on the corrosion behavior of pure copperin synthetic seawater Journal of Nuclear Materials, 379, pp.154–161 (2008).
- 9) 岡田秀彌、細井祐三、阿部征三郎、山本州一:オーステナイトステンレス鋼の迅速応力腐食 割れ試験法、日本金属学会誌、38、646-653(1974).
- 10) 永田公二、佐藤史郎:リン脱酸銅の応力腐食割れについて、住友軽金属技報、24、No. 3, 4, 97-107(1983).
- 11)本間信之、千葉恭彦、棚井憲治: "銅-炭素鋼複合オーバーパックの試作" JNC TN8400 99-049(1999).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位				
甘木昌	SI 基本 ⁱ	単位		
巫平里	名称	記号		
長 さ	エメートル	m		
質 量	 書キログラム	kg		
時 間	引 秒	s		
電防	充アンペア	А		
熱力学温度	重ケルビン	Κ		
物質量	 して ル	mol		
光图	度カンデラ	cd		

表2. 基本单位	位の例			
如士昌	SI 基本単位	SI 基本単位		
和工里	名称	記号		
面	積 平方メートル	m^2		
体	積立法メートル	m^3		
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 ⁻¹		
密 度 , 質 量 密	度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³		
面 積 密	度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²		
比 体	積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg		
電 流 密	度アンペア毎平方メートル	A/m^2		
磁界の強	さアンペア毎メートル	A/m		
量 濃 度 ^(a) , 濃	度モル毎立方メートル	mol/m ³		
質量濃	度キログラム毎立法メートル	kg/m ³		
輝	度カンデラ毎平方メートル	cd/m^2		
屈 折 率	^(b) (数字の) 1	1		
比透磁率	^(b) (数字の) 1	1		

表5. SI 接頭語 乗数 接頭語 記号 乗数 接頭語 記号 10^{24} Υ タ Ε 10^{-1} シ d 10^{-2} 10^{21} センチ ゼ タ Ζ с 10^{18} 10^{-3} エク サ Е 111 IJ m 10^{15} 10^{-6} \sim タ Ρ マイクロ μ 10^{-9} 10^{12} ラ Т テ ナ n 10^{-12} 10^9 G Ľ ギ ガ コ \mathbf{p} 10^{-15} 10^{6} ガ フェムト Μ f 10^{-18} 10^3 \Box ア キ k ŀ а 10^{-21} 10^2 丶 ク ŀ h ゼプ ŀ \mathbf{Z} 10^{-24} 10^1 da ヨク デ 力 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=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	0	1°=(п/180) rad
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^{2}=10^{4}m^{2}$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^{3}=10^{3}cm^{3}=10^{-3}m^{3}$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$

(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 組立単位	
組立量	反升	뷥	他のSI単位による	SI基本単位による
	泊你	記方	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$\mathrm{sr}^{(\mathrm{c})}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	\mathbf{J}	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率,工率,放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
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	\mathbf{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^2	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Η	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	$cd sr^{(c)}$	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gy	J/kg	$m^2 e^{-2}$
カーマ		Сy	0/Kg	111 5
線量当量,周辺線量当量,方向	Sun All h (g)	$\mathbf{S}_{\mathbf{V}}$	J/kg	$m^2 e^{-2}$
性線量当量, 個人線量当量		DV	orng	m 5
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI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。

(b) 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。

(c)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)ヘルツは周期現象についてのみ、ベク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。 (e)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。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。 (f)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勧告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

	SI 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	$m^{-1}kg s^{-1}$		
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$		
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²		
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$		
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 ⁻³		
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 ⁻³ K ⁻¹		
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s ⁻²		
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹		
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA		
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA		
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA		
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$		
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$		
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 ⁻¹ sA		
吸収線量率	グレイ毎秒	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	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$		
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol		

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	SI 単位で表される数値	
電	子オ	ドル	Υ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	ル	ŀ	ン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一	原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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			SI 単位で表される数値			
バ	Ţ	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロ	- J	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	Μ	1 M=1852m			
バ	<u> </u>	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{ m}^2$			
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	<u> </u>	パ	Np ¯	CT光伝しの粉体的な眼体は			
ベ		ル	В	▶ 51 単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。			
デ	ジベ	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			
工	ル	グ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$			
ダ	イ	ン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポ	P	ズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ス	トーク	ス	\mathbf{St}	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$			
ス	チル	ブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フ	オ	\mathbb{P}	\mathbf{ph}	1 ph=1cd sr cm $^{-2}$ 10 ⁴ lx			
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$			
7	クスウェ	ル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガ	ウ	ス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
I,	ルステッド(с)	Oe	1 Oe \triangleq (10 ³ /4π)A m ⁻¹			

(c) 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	属さないその他の単位の例
	名種	尓		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ント	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
\checkmark			Д	rem	$1 \text{ rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{Sv}$
ガ	ン		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	エ	ル	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル系	カラッ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
\mathbb{P}			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準 大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	D	IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ň	ク	П	ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

(第8版, 2006年改訂)