JAEA-Research 2009-068



炭酸塩水溶液および人工海水における炭素鋼の 腐食挙動に及ぼす材料中不純物元素の影響

Effect of Impurity Elements in Metal on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in Carbonate Aqueous Solution and Synthetic Seawater

谷口 直樹 鈴木 宏幸 内藤 守正

Naoki TANIGUCHI, Hiroyuki SUZUKI and Morimasa NAITO

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2010

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

炭酸塩水溶液および人工海水における炭素鋼の腐食挙動に及ぼす 材料中不純物元素の影響

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+, 鈴木 宏幸*, 内藤 守正

(2009年12月18日受理)

腐食現象は材料と環境の相互作用であり,地層処分環境における炭素鋼オーバーパックの腐食 挙動は環境因子の影響だけでなく,材料因子による影響を受ける可能性がある。本研究では炭素 鋼中に一般的に含まれる主要な不純物であるC,Si,Mn,P,Sに着目し,炭酸塩水溶液と人工海水 を用いて,これらの元素が電気化学的挙動と低酸素濃度下での腐食速度に及ぼす影響を調べた。 その結果は以下のようにまとめられる。

- 0.01M炭酸塩(pH10)溶液中での不動態化電流,不動態保持電流に及ぼす不純物元素の 影響は小さいことが確認された。
- Si濃度が比較的高い0.73%と0.97%の条件では不動態皮膜の破壊やアノード溶解の促進が観察された。
- 0.01M炭酸塩(pH10)溶液の飽和した緩衝材共存下では不動態化せず,アノード分極挙動への不純物元素の影響も小さいことが確認された。
- 人工海水中,低酸素濃度下での腐食速度は不純物元素濃度が大きいほど腐食速度は大きく なる傾向があり, P, Mnによる影響が比較的大きくなった。
- 人工海水系での電気化学測定ではSi, Mn, Pの添加により, 溶液単独系, 緩衝材共存系とも にカソード反応が促進された。また, 緩衝材共存系での浸漬試験ではこれらの元素の添加 によって腐食量が大きくなる傾向が認められた。

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

*検查開発株式会社:環境技術管理部処分技術課兼務

Effect of Impurity Elements in Metal on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in Carbonate Aqueous Solution and Synthetic Seawater

Naoki TANIGUCHI⁺, Hiroyuki SUZUKI^{*} and Morimasa NAITO

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

(Received December 18, 2009)

Corrosion is an interaction between the metal and the environment, so that the corrosion behavior of carbon steel overpack might be affected by not only the environmental factors but also the material factors. In this study, the effect of general impurities in carbon steel such as C, Si, Mn, P and S on the electrochemical behavior and the corrosion rate were studied using carbonate aqueous solution and synthetic seawater. The experimental results were summarized as follows;

- The effect of the impurities on the critical passivation current density, *I_p* and the passive current density, *I_{pass}* were small in 0.01M carbonate aqueous solution at pH 10.
- Breakdown of passive film and increase in anodic dissolution were observed in the tests for high Si condition of 0.73% and 0.97%.
- In buffer material saturated with 0.01M carbonate aqueous solution, no passivation was observed and the effect of impurities on the anodic polarization behavior was small.
- The corrosion rate of carbon steel in seawater was increased with the concentration of impurities. Among the impurity elements, the effects of P and Mn were relatively large.
- The results of the electrochemical measurement showed that the cathodic reaction was accelerated by the addition of Si, Mn and P respectively in synthetic seawater environment. The amount of corrosion observed in the immersion test in buffer material was also increased by the addition of these elements.

Keywords: Carbon Steel, Overpack, Impurity, Carbonate, Synthetic Seawater, Passivation, Corrosion Rate

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

^{*} Inspection Development Company Ltd.: Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department (additional post)

目 次

1.	はじめに -	1	
2.	実験方法	2	
3.	実験結果	8	
4.	考察	27	
5.	おわりに -	30	
参え	考文献	31	

Contents

1.	Introduction	-1
2.	Experimental Procedure	$\cdot 2$
3.	Results	8
4.	Discussions2	7
5.	Summary3	0
Re	ferences3	1

This is a blank page.

1 はじめに

炭素鋼はオーバーパック候補材料のうち,基本材料に位置付けられており ¹⁾,優先的に処分環 境における腐食挙動の検討が行われてきた。これまでに幅広い環境条件を想定して腐食挙動が調 べられており 2034),環境因子の影響に関する知見の整備が進んでいる。しかし、腐食現象は材料 と環境の相互作用であり、環境因子だけでなく材料因子の影響も受けると考えられる。炭素鋼と して分類される材料であっても材料中成分、機械的特性など材料特性には幅があり、その特性の 違いによってオーバーパックとしての適用性や長期耐食性も異なると考えられる。一般的に、中 性の天然水中における鋼材の腐食は溶存酸素の拡散が律速し、合金鋼を除けば材質の影響は小さ いとされている 5。また,炭素鋼オーバーパックの寿命評価における酸素による腐食量評価では, トータルの腐食量の上限は人工バリア中に持ち込まれた酸素量によって見積もられており¹⁾,炭 素鋼の材質には依存しない。しかし、腐食形態や腐食局在化の程度、応力腐食割れや水素脆化の 感受性は材質によって異なる可能性がある。また、酸素が消費された後の還元性雰囲気での腐食 量は腐食速度から見積もられており¹⁾,腐食速度は材質によって異なる可能性がある。処分環境 を想定した条件での炭素鋼の腐食挙動に及ぼす材料因子の影響については、これまで溶接による 影響 67, 合金成分の影響 8が調べられているものの, 炭素鋼中に通常含まれる C, Mn, Si, P, S な どの不純物に関する検討例は少ない。既往の研究のうち、溶接による影響の検討 677では、TIG 溶接, MAG 溶接および 電子ビーム溶接による溶接試験体からそれぞれ採取した試験片を用いて 処分環境での腐食挙動が調べられている。その結果によると、電子ビーム溶接部は母材と同等以 上の耐食性を示したことに対し、TIG 溶接および MAG 溶接の溶接金属部において耐食性の低下 や選択的な腐食の進展が確認されている。この原因のひとつとして、溶接金属部と母材の化学成 分の違いが挙げられている 6。TIG および MAG 溶接は溶加材を用いた溶接方法であり、その成 分は母材と異なっている。特に,Si,Mn,Sの濃度が母材よりも溶接金属部で高くなっており,耐 食性低下や選択的な腐食の原因の可能性として指摘されている 677。三井ら 6は、金属組織の違い による影響も検討し、結晶粒径の違いや不純物の粒界偏析の可能性を否定していないものの、溶 接に使用する前の溶加材と溶接金属とのアノード分極特性にほとんど違いが認められていないこ となどから化学成分の影響の可能性が高いと評価している。Si, Mn, S についてはいずれの元素も 耐食性を低下させる作用があるという報告 91011)もある。化学成分の観点から溶接金属部の耐食 性低下の原因を明らかにし、溶加材の最適化など工学的対策を構築するためには不純物成分個々 の影響を把握する必要がある。さらに、溶接部だけでなく母材についても今後の地層処分の事業 の進展に向けてオーバーパックとしての材質を具体化していく必要があり、耐食性に及ぼす不純 物元素の影響を明らかにすることが重要である。そこで本研究では炭素鋼中の代表的な不純物成 分である C, Mn, Si, P, S を対象に, 個々の元素が腐食挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目 的として炭酸塩水溶液および人工海水を用い、炭素鋼の電気化学的挙動と腐食速度に及ぼすこれ ら不純物元素の影響を実験的に調べた。

2 実験方法

2.1 試験片

試料の作成は次のように行った。原材料には電解鉄、炭素粒、メタリックシリコン、電解マン ガン、フェロリン、フェロサルファーを用い、所定の濃度となるように原料を秤量して真空プラ ズマアークによるボタン溶解を行い、φ40×20mmの鋳塊を作製した。次に、より均質な金属組 織を得るために 1050℃にて熱間鍛造を行い, 35×35×20mm に成形した。更に, 歪みを除去す るため 700℃で 10 分間の焼鈍,空冷を行った。今回作成した試料中の各成分濃度は C を除き炭 素鋼オーバーパックの試作で用いられた鍛鋼品 SFVC1 (JIS-G3202) および TIG 溶接材 YGT50 (JIS-Z3316)の規格に規定されている組成範囲内とした。C については、溶接施工性の観点か らC濃度約0.2%未満の低炭素鋼の適用が検討されているものの¹²⁾,より幅広く濃度の影響を把 握するため、「炭素鋼」に分類されるC濃度(約2%以下)の範囲にて検討を行った。なお、Sに ついては単独添加では顕著な偏析が生じたため他の元素も同時添加し,S濃度のみ変えた試料を 作成した。S以外の元素濃度は、これまでの溶接部の耐食性評価試験 67 における TIG 溶接金属 部の組成とほぼ同一の条件とし、Cu も 0.24%添加した。この他に、不純物を複合的に含む材料 として、オーバーパックの試作 ¹³⁾で用いられている炭素鋼鍛鋼品, JIS G3202 SFVC1 の試料も 用いた。これらの試料から平板(30×30×2mm)の試験片を切り出した。試験片表面はエメリ ー#800 湿式研磨にて仕上げるとともに、アセトンによる脱脂を行った。各試料中の成分濃度は C, S については赤外線吸収法, Si, Mn, P, Cu については蛍光 X 線分析法により求めた。実験に 用いた試験片の成分(分析値)を表 2.1 に示す。また、各材料のミクロ組織を図 2.1 に示す。純 鉄はほぼフェライト相のみであり, C 濃度 0.1%ではフェライトの粒内にパーライトが島状に散在 していた。Fe-CにSi, P, を添加した場合とMnを 0.28%添加した場合にもこれと類似の組織が 観察された。C濃度 0.41%では微細なフェライトとパーライトがほぼ均一に混在したような組織 が観察された。炭素濃度が共析組成(C濃度 0.77%)を超える C濃度 1.12%の試料ではパーライ トが散在していたほか、セメンタイトと思われる白色を呈した組織の析出も観察された。Mn を 1.92%添加した場合には微細なフェライトと帯状に分布しているパーライトから構成されている ように見える。S濃度 0.001%と 0.013% (いずれも C, Si, Mn, P, Cu 複合添加)の試料について も微細なフェライトとパーライト組織が観察された。SFVC1 においてもフェライト/パーライ ト組織が観察されており、S濃度をパラメータとした試料に比較的してフェライト、パーライト とも結晶粒は大きい。

2.2 電気化学試験方法

処分場閉鎖後初期の比較的酸化性雰囲気での炭素鋼の腐食形態は不動態化するか否かによって 異なり、不動態化する場合には局部腐食型の腐食形態となり、不動態化しない場合には全面腐食 型となる¹⁾。本研究では炭素鋼が容易に不動態化する溶液条件と不動態化しない溶液条件につい てアノード分極特性に及ぼす材料中不純物元素の影響を調べた。前者については 0.005M-NaHCO₃ + 0.005M-Na₂CO₃水溶液 (pH10)を、後者についてはASTM D1141に準拠 した人工海水 (pH8.4)を試験溶液として用いた。試験温度は既往の実験条件²⁾³⁾⁴⁾にしたがい、 80℃とした。試験片を脱気した試験溶液に浸漬し、自然電位より 20mV/min の走査速度でアノー ド分極測定を行った。人工海水中での試験については低酸素濃度下での水素発生反応による腐食 挙動も調べるため、カソード分極測定も実施した。 2.3 浸漬試験方法

地下深部本来の低酸素濃度下における腐食速度に及ぼす材料中不純物の影響を明らかにするた め、酸素濃度 1ppm 以下の窒素雰囲気下で浸漬試験を行った。試験溶液には初期の腐食速度が比 較的大きい ²⁰人工海水を用いた。また、現時点の緩衝材仕様 ¹⁰を想定したベントナイトーケイ砂 混合体 (配合比 7:3,乾燥密度 1.6g/cm³)中で試験を行った。温度は 2.2 と同様に 80℃とした。 試験片を図 2.2 に示すように純チタン製の試験カラムに充填したのち、カラム内の酸素を除去す るため真空引きと窒素置換を 3 回以上行った。更に、12 時間以上 0.1Torr 程度の減圧下に静置し た。次にこれを酸素濃度(気相部濃度)1ppm 以下のグローブボックスに搬入し、脱気した試験 溶液と試験カラムを PTFE 製の試験容器に入れた。この試験容器を図 2.3 に示すように、グロー ブボックス中の恒温槽内に定置した。試験期間は 90 日とした。浸漬期間終了後は試験片を取り 出し、5%塩酸中(インヒビターとして朝日化学製イビット No.2S を 0.3%添加)で腐食生成物を 除去して重量減少法により腐食量を測定した。

		-	• = • = • •			. (/~/	
材料	С	Si	Mn	Р	S	Cu	備考
純鉄	0.0043	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0014	< 0.01	
Fe-C	0.10	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0008	< 0.01	
0 2334-4	0.41	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0006	< 0.01	
	1.12	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0006	< 0.01	
ロンジョイータ	0.15	0.1	< 0.01	0.003	0.0005	< 0.01	
51//////	0.15	0.97	< 0.01	0.003	0.0001	< 0.01	
Ma パライータ	0.10	< 0.01	0.28	0.003	0.0011	< 0.01	
	0.10	< 0.01	1.92	0.003	0.0011	< 0.01	
Dパラメータ	0.10	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0008	< 0.01	低 D 濃度試約は DarC は と同一
INTER	0.14	< 0.01	< 0.01	0.05	0.0009	< 0.01	以Ⅰ
ロパラメータ	0.10	0.73	1.37	0.012	0.001	0.24	他の元妻と海へ沃加
3////-2	0.10	0.73	1.37	0.012	0.014	0.24	他の几糸も骸百弥加
SFVC1	0.22	0.26	0.93	0.013	0.005	0.05	

表 2.1 試験片の化学成分(%)



図 2.1 試験に用いた試料のミクロ組織観察結果

Fe-C- 0.28Mn	50 μ m	Fe-C- 1.92Mn	50μ m
Fe-C- 0.05P (下段 は拡大)	50 µ m	Fe-C-Si- Mn-P- 0.001S (下段 は拡大)	<u>Бо</u> ит
Fe-C-Si- Mn-P- 0.0148	50 µ m	SFVC1	50-44 m

図 2.1 (続き) 試験に用いた試料のミクロ組織観察結果



図 2.2 緩衝材中における炭素鋼の浸漬試験カラムの模式図



図 2.3 低酸素濃度下における炭素鋼の浸漬試験方法の模式図

3 実験結果

3.1 電気化学測定結果

(1) 0.01M 炭酸塩水溶液での結果

アノード分極特性に及ぼす C 濃度の影響を図 3.1 に示す(上段はアノード分極曲線全体,下段 は-500mV vs.SCE までの範囲を拡大)。-650mVvs.SCE 付近の第 2 ピーク電流は C 濃度 0.41 以 上の条件で観察され, C 濃度の高いほうが大きな値を示した。また,活性態のピーク電流(以下, I_p)は C 濃度の高い 0.41%, 1.12%でやや大きくなった。不動態保持電流(以下, I_{pass})につい ても C 濃度依存性は明瞭ではなく,ほぼ同程度の大きさとなった。

図 3.2 に Si による影響を示す。*L* は Si 添加によって大きくなるものの,0.1%と0.9%で違いは なかった。また,活性態ピーク後の電流は-450mV vs.SCE までは高 Si 条件のほうが小さくなっ た。しかし,Si 濃度 0.9%では-400mV 付近で電流値の急激な増加が観察された。この試験後の 試験片は全面が溶解しており,皮膜破壊が生じたと考えられる。

図 3.3 に Mn による影響,図 3.4 に P による影響を示す。いずれの元素もアノード分極挙動に はほとんど影響を及ぼさなかった。S 濃度を変えた試料では図 3.5 に示すようにいずれも図 3.2 と同様に-400mV vs.SCE 付近で電流値の増加が観察された。S 濃度を変えた試料は Si, Mn, P も 含んでおり,Si が比較的高い(約 0.7%)。この高 Si 条件によって皮膜破壊が生じたものと考え られる。ただし,S 濃度の違いによるアノード分極挙動への影響は認められなかった。

アノード分極曲線より得られた *I_p*と *I_{pass}*について,各元素濃度による影響を図 3.6 に示す。いずれも不純物元素濃度とともにわずかに増加傾向を示す場合もあるが,顕著な影響はなく,これらの元素を複合的に含む SFVC-1 においてもほぼ同程度の値を示した。

(2) 0.01M 炭酸塩水溶液中,緩衝材共存下での結果

図 3.7~図 3.11 に緩衝材共存下でのアノード分極挙動に及ぼす C, Si, Mn, P, S の影響をそれぞ れ示す。図 3.7 に示すように、C 濃度が最も低い 0.0043%においてアノード電流がやや小さくな っているものの、これ以上の C 濃度条件ではほぼ同様の分極挙動を示した。また、他の元素につ いても図 3.8~図 3.11 に示すように、アノード分極挙動への影響はほとんど認められなかった。

(3) 人工海水中での結果

図 3.12 に人工海水中でのアノード/カソード分極特性に及ぼす C 濃度の影響を示す(上段は アノード/カソード分極曲線全体,下段は-750~650mV vs.SCE の範囲を拡大)。C 濃度が高い ほどアノード電流は低下する傾向が認められた。また,カソード電流への影響はほとんど認めら れなかった。次に,図 3.13 にアノード/カソード分極挙動に及ぼす Si, Mn, P の影響を示す(上 段はアノード/カソード分極曲線全体,下段は-850~950mV vs.SCE までの範囲を拡大)。自然 電位~自然電位+200mV 付近ではいずれの元素もアノード電流にはほとんど影響を及ぼさなか ったが,Si の添加によって-650mV vs.SCE 以上の電位条件でアノード電流がやや大きくなった。 ただし,約-600mV vs.SCE 以上の電位では,溶液抵抗がアノード電流に対して支配的になってお り,Si によるアノード電流の増加は実験系における溶液抵抗(ルギン管と試験片の距離)の違い の影響の可能性もあり,今後再現性を確認する必要がある。一方,カソード電流については Si, Mn, P の添加によって増加する傾向を示した。S についても図 3.14 に示すように,カソード電流を増 加させる作用が認められた。

(4) 人工海水中,緩衝材共存下での結果

図 3.15 に人工海水中,緩衝材共存下でのアノード/カソード分極特性に及ぼす C 濃度の影響 を示す(上段はアノード/カソード分極曲線全体,下段は-800~-900mV vs.SCE の範囲を拡大)。 C 濃度が高いほどアノード電流は低下する傾向が認められた。また,カソード電流への影響はほ とんど認められなかった。次に,Si,Mn,Pの添加による影響を図 3.16 に示す(上段はアノード /カソード分極曲線全体,下段は-800~-900mV vs.SCEの範囲を拡大)。Mn,Pを添加した場合 に約-400mV vs SCE 以上の電位でアノード電流が異なるものの,自然電位〜約-400mV vs SCE の範囲ではこれらの元素による影響はほとんど認められなかった。カソード電流についても大き な影響は認められないが,下段の拡大図に示すように,これらの元素の添加によって増加する傾 向を示した。S 濃度を変えた試験では,図 3.17 に示すように全体的にS 濃度の高いほうがアノー ド電流,カソード電流ともに小さくなる傾向を示したが,自然電位付近ではほとんどアノード, カソードともに電流密度に違いは認められなかった。

3.2 浸漬試験結果

各条件での腐食量測定結果を表 3.1 に示す。また,各元素濃度と腐食速度(腐食量を試験期間 で除した値)の関係を図 3.18~図 3.22 に示す。S を除き,概ね濃度が高いほど腐食速度は大き くなる傾向を示した。特に,P による影響が比較的大きいことがわかった。Mn についても高濃 度側での影響が大きいように見える。また,これらの元素を複合的に含む SFVC1 において比較 的大きな腐食速度を示した。ただし,S 濃度を変えた試料では,各元素が比較的高い濃度で含ま れているものの,SFVC1 よりも小さな腐食量となり,S濃度の違いによる腐食量への影響も認め られなかった。

JAEA-Research 2009-068

材料 化学成分(%)						腐食量 (µm)	腐食速度 (µm/y)	
	С	Si	Mn	Р	S	Cu		
純鉄	0.0043	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0014	< 0.01	2.82	11.43
							2.84	11.50
Fe-C	0.1	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0008	< 0.01	3.12	12.67
				2.94	11.94			
	0.41	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0006	< 0.01	4.28	17.34
Cパラメーター				0.000	0.0000	0.01	3.25	13.17
	1.12	< 0.01	< 0.01	0.003	0.0006	< 0.01	3.36	13.62
				0.01	3.81	15.45		
	0.15	0.1	<0.01	0.003	0.0005	< 0.01	3.48	14.13
Siパラメーター							3.26	13.22
~~ ///	0.15	0.97	<0.01	0.003	0.0011	< 0.01	3.64	14.78
			-0.01				3.49	14.17
	0.1	<0.01	0.28	0.003	0.0011 <0.0	<0.01	2.96	11.99
Mn パラメーター	0.1	.0.01	0.20	0.000		-0.01	3.37	13.67
	0.1	< 0.01	1.92	0.003	0.0011	<0.01	3.58	14.53
	0.1	-0.01	1.02	0.000	0.0011	\$0.01	4.44	18.03
	0.1	<0.01	<0.01	0.003	0.0008	< 0.01	3.12	12.67
P パラメーター	0.1	-0.01	-0.01				2.94	11.94
1 / / / /	0.14	<0.01	<0.01	0.05	0 0000	<0.01	4.55	18.46
	0.14	<0.01	<0.01	0.05	0.0003	<0.01	5.49	22.26
	0.19	0.74	1 37	0.019	0.014	0.94	3.51	14.23
C パラメータ	0.12	0.74	1.07	0.012	0.014	0.24	3.40	13.81
	0.10	0.79	1.97	0.019	0.001	0.94	3.62	14.67
	0.12	0.73	1.37	0.012	0.001	0.24	3.81	15.45
CEVO1	0.99	0.90	0.02	0.019	0.005	0.05	4.89	19.84
SFVC1	0.22	0.26	0.93	0.013	0.005	0.05	4.84	19.64

表 3.1 人工海水中,緩衝材共存下での浸漬試験結果



(1) アノード分極曲線全体



(2) -1000~500mV vs.SCE の部分の拡大

図 3.1 0.01M 炭酸塩溶液中のアノード分極挙動に及ぼす C 濃度の影響



図 3.2 0.01M 炭酸塩溶液中におけるアノード分極挙動に及ぼす Si の影響



図 3.3 0.01M 炭酸塩溶液中におけるアノード分極挙動に及ぼす Mn の影響



図 3.4 0.01M 炭酸塩溶液中におけるアノード分極挙動に及ぼす Pの影響



図 3.5 0.01M 炭酸塩溶液中におけるアノード分極挙動に及ぼすSの影響



図 3.6 不動態化電流密度, Ipおよび不動態保持電流密度 Ipass に及ぼす C, Si, Mn, P, Sの影響



図 3.7 0.01M 炭酸塩溶液中,緩衝材共存下におけるアノード分極挙動に及ぼす Cの影響



図 3.8 0.01M 炭酸塩溶液中,緩衝材共存下におけるアノード分極挙動に及ぼす Siの影響



図 3.9 0.01M 炭酸塩溶液中,緩衝材共存下におけるアノード分極挙動に及ぼす Mn の影響



図 3.10 0.01M 炭酸塩溶液中,緩衝材共存下におけるアノード分極挙動に及ぼす Pの影響



図 3.11 0.01M 炭酸塩溶液中,緩衝材共存下におけるアノード分極挙動に及ぼす Pの影響



(2) アノード側-750~-650mV vs.SCE の部分の拡大

図 3.12 人工海水中におけるアノード/カソード分極挙動に及ぼす C 濃度の影響



(2) カソード側-850~-950mV vs.SCE の部分の拡大

図 3.13 人工海水中におけるアノード/カソード分極挙動に及ぼす Si, Mn, Pの影響



(1) アノード/カソード分極曲線全体



図 3.14 人工海水中におけるアノード/カソード分極挙動に及ぼすSの影響



(1) アノード/カソード分極曲線全体



(2) カソード側-800~-900mV vs.SCE の部分の拡大

図 3.15 人工海水中,緩衝材共存下におけるアノード/カソード分極挙動に及ぼす C 濃度の影響



(1) アノード/カソード分極曲線全体



(2) カソード側-800~-900mV vs.SCE の部分の拡大

図 3.16 人工海水中,緩衝材共存下におけるアノード/カソード分極挙動に及ぼす Si, Mn, Pの影響



図 3.17 人工海水中,緩衝材共存下におけるアノード/カソード分極挙動に及ぼす S濃度の影響



図 3.18 人工海水中,緩衝材共存下における平均腐食速度と C 濃度の関係



図 3.19 人工海水中,緩衝材共存下における平均腐食速度と Si 濃度の関係



図 3.20 人工海水中,緩衝材共存下における平均腐食速度と Mn 濃度の関係



図 3.21 人工海水中,緩衝材共存下における平均腐食速度と P 濃度の関係



図 3.22 人工海水中,緩衝材共存下における平均腐食速度と S 濃度の関係

4 考察

4.1 炭素鋼の電気化学的挙動に及ぼす不純物元素の影響

今回行った 0.01M 炭酸塩水溶液中では、C 濃度が高いほど I_p , I_{pass} がわずかに増加する傾向が 認められたものの、不純物元素による I_p , I_{pass} への影響は小さいことがわかった。類似の環境に おける検討例として、土屋ら¹⁴⁾が C 濃度による不動態化挙動への影響について調べた研究がある。 本試験条件に近い pH10 の炭酸塩溶液では、 I_p , I_{pass} への C 濃度の影響は小さいものの、高濃度 ほど I_{pass} が大きくなる傾向が観察されており、今回の結果はこれと概ね整合する。ただし、 I_p , I_{pass} に及ぼす C 濃度の影響については溶液条件によって異なり、C 濃度に大きく依存する場合も あるため¹⁴⁾、今後更にデータの拡充が必要である。

不純物元素による *I_p*, *I_{pass}への影響は小さいものの*,図 3.2,図 3.5 に示すように高 Si 濃度条件で皮膜破壊による電流密度の急激な増加が観察された。同様の事例は TIG 溶接金属のアノード分極測定において観察されている 6。これらの原因は明らかにされていないが,今回の結果より,溶接金属の Si 濃度が比較的高いこと(約0.7%)が主要な原因と考えられる。Si による皮膜破壊作用については報告例がみあたらず,メカニズムなどは不明であるが,不動態化しない人工海水中においても図 3.13 に示すようにアノード電流が増加しており,比較的酸化性雰囲気におけるアノード溶解反応が Si によって促進されている可能性も考えられる。Malik ら9も大気吹き込み下,3.5%NaCl 水溶液中において溶接部の Si 濃度が高いほど溶接部における減肉量が大きくなると報告している。以上のことから,不動態化する環境,全面腐食環境とも比較的酸化性の環境において Si は耐食性の低下をもたらす可能性があると考えられる。

0.01M 炭酸塩溶液を浸潤させた緩衝材中では不動態化せず,ほぼ活性溶解型の分極挙動を示した。また,約0mV vs SCE までは不純物元素による影響もほとんど認められなかった。Si によるアノード電流の増加も観察されておらず,炭酸塩環境では緩衝材によって材料中成分による影響が緩和されている可能性がある。一方,人工海水中では緩衝材共存の有無によって不純物元素の影響も異なる結果が得られた。人工海水単独の場合は C 濃度が高いとアノード電流は低下するがカソード電流は変化しなかったことに対し,緩衝材共存下では逆にアノード電流に変化がなく,カソード反応が抑制された。Si, Mn, P についても人工海水単独,緩衝材共存系ともにカソード電流への影響が認められているものの,各元素による影響の程度は異なっており,Fe-C にSi(0.97%), Mn(1.92%), P(0.05%)をそれぞれ添加した場合のカソード電流を比較すると,人工海水単独では Si を添加した試料が、緩衝材共存系では P を添加した試料が最も大きい。このように、緩衝材の有無によって異なる挙動を示したものの,人工海水系において C は腐食を抑制する(アノードまたはカソードを抑制)方向に作用し,Si, Mn, P は腐食を促進(カソード反応を促進)する作用を有すると考えられる。

4.2 人工海水中における低酸素濃度下での炭素鋼の腐食速度に及ぼす不純物元素の影響

人工海水中,緩衝材共存下での浸漬試験では、Sを除いて不純物成分濃度が高いほど腐食速度 も大きくなった。一般に酸性溶液中における鉄鋼の腐食は不純物成分の濃度が高いほど大きいこ とが知られており¹⁵⁾,原因として水素過電圧を低下させる,活性なカソードサイトを形成するこ となどカソード反応への影響が指摘されている。本試験においても図 3.15 に示すように、Si, Mn, P の添加によるカソード反応の促進が示唆されている。ここで、Fe-C 鋼および Fe-C 鋼に Si(0.97%), Mn(1.92%), P(0.05%)をそれぞれ添加した場合の浸漬試験で得られた腐食速度と、図 3.15(2)のカソード分極曲線における Tafel線の内挿より得た自然電位付近(-790mV vs.SCE)

での電流密度を比較すると,図4.1に示すようになる。浸漬試験得られた腐食速度は大きい順に Fe-C-0.05P, Fe-C-1.92Mn, Fe-C-0.97Si となっており、分極曲線でのカソード電流密度の大きい 順と一致する。本試験系は酸素濃度の低い環境であり、カソード反応は、水の還元または炭酸水 素イオンの還元反応など水素発生反応と考えられる。このように, Si, Mn, P については, 従来, 酸性溶液中で言われているような水素発生反応の促進によって腐食速度が増加するという機構に よって浸漬試験結果を定性的に説明できるように見える。しかし、Cについては、図3.15に示す ように、高濃度になるほどカソード反応は抑制される傾向が示唆されており、水素発生反応の促 進による機構では説明ができない。これまで、材料中成分が電気化学的特性におよぼす影響と実 際の腐食量に及ぼす影響の両方を比較検討した例として、広谷ら 8の研究が挙げられる。この研 究では、Fe-0.12C 鋼に種々の合金成分を添加した試料を用いて電気化学試験と浸漬試験を行い、 初期腐食速度と長期腐食速度に及ぼす種々の合金元素影響を調べている。例えば 0.5%の Ni を添 加した材料の場合、カソード分極曲線から推定される腐食速度と浸漬初期(0.5 日)の腐食量は 大きいが、40日および100日の試験での腐食量はむしろ小さくなることを報告している。また、 Moの場合には、カソード電流、初期腐食量、長期(40日、100日)腐食量ともに大きくなると している。更に, Ni を添加した材料のように長期的な腐食速度が小さくなった材料には密着性の よい緻密な皮膜が形成されていることを確認しており、各成分の皮膜形成機構への関与について 明らかにする必要性を指摘している。したがって、実際の浸漬試験で観察される腐食量や腐食速 度に対する元素の影響についてそのメカニズムを明らかにするには、電気化学的挙動への影響の ほか、皮膜の性状や保護性に対する影響の観点からも検討が必要と考えられ、今後腐食速度の経 時変化、形成される皮膜性状についてより詳細な検討が必要である。

Sについては、溶接部の溝状腐食を促進するなど一般には耐食性を低下させる元素として知ら れている¹¹⁾。酸性溶液中でもS添加によって水素過電圧が低下して腐食速度が増加するという報 告がある15)。一方、今回の実験では、人工海水中で従来の酸性溶液中での結果と同様にカソード 電流の増加が観察されたものの,緩衝材中では電気化学測定,浸漬試験のいずれにおいてもS濃 度による腐食の促進は認められなかった。緩衝材の有無による違いや緩衝材中においてSによる 影響が緩和された原因は明らかではないが, S による影響が抑制された事例として Stern et al. 15) が硫酸環境においてSとCuの複合添加による効果を報告している。種々のCu濃度とS濃度の 組み合わせに対して腐食量を測定し、Cu濃度が約0.1%以上でかつS濃度が約0.01%以上の場 合にはS濃度の高いほうが腐食量は小さくなることを観察しており、そのメカニズムとして、Cu の共存によってSがCu₂Sのような安定な化学種として固定化され、アノード溶解が抑制される ためとしている。今回のS濃度をパラメータとした試験で用いた試料には0.24%のCuが含まれ, S濃度の高い(0.013%)ほうが全体的にアノード電流も小さくなっていることなど、類似点も見 られる。しかし、CuとSの共存の効果が発現される環境条件や、環境条件によってSの影響が 異なる理由など明らかではなく、緩衝材中におけるSによる影響緩和のメカニズムや条件につい ては今後の課題である。一般的に炭素鋼中のSはMnSに代表される介在物として存在し,前述 の溝状腐食のように腐食を促進する方向に作用する例も多い。したがって材料中の濃度だけでな く, Mn, Cu のような S を固定化する元素との共存による影響や化学形態も含めてその影響を評 価する必要がある。Mn についても固溶した状態での合金元素としての作用と介在物としての作 用は異なると考えられ、存在形態による違いについて検討する必要がある。



Fe-C Fe-C-0.97Si Fe-C-1.92Mn Fe-C-0.05P

図 4.1 Fe-C 鋼に Si(0.97%), Mn (1.92%), P(0.05%)をそれぞれ添加した場合の腐食速度と -790mV vs.SCE 付近での電流密度の比較(上段:浸漬試験で得られた腐食速度,下段:カソード 分極曲線の Tafel 線の内挿から得られた電流密度)

5 おわりに

炭素鋼中に含まれる不純物であるC, Si, Mn, P, Sに着目し、これらの元素が電気化学的挙動と低酸素濃度下での腐食速度に及ぼす影響を調べた。その結果は以下のようにまとめられる。

- 0.01M炭酸塩(pH10)溶液中での不動態化電流,不動態保持電流に及ぼす不純物元素の 影響は小さいことが確認された。
- 酸化性環境ではSiは不動態皮膜の破壊やアノード溶解の促進をもたらすことが示唆された。
- 0.01M炭酸塩(pH10)溶液の飽和した緩衝材共存下では不動態化せず,アノード分極挙動への不純物元素の影響も小さいことが確認された。
- 低酸素濃度下での腐食速度は不純物元素濃度が大きいほど腐食速度は大きくなる傾向が あり、P, Mnによる影響が比較的大きくなった。
- 人工海水系での電気化学測定ではSi, Mn, Pの添加により, 溶液単独系, 緩衝材共存系とも に水素発生反応が促進された。また, 緩衝材共存系での浸漬試験ではこれらの元素の添加 によって腐食量が大きくなる傾向が認められた。

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) 本田明,谷口直樹,石川博久,藤原和雄:低溶存酸素条件下における炭素鋼の腐食挙動の実 験的検討,動燃技報,No.104, pp.125-134 (1996).
- 3) 谷口直樹, 森本昌孝, 本田明: ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討, サイ クル機構技報, No.4, pp.87-91 (1999).
- 谷口直樹,本田明,川崎学,森田光男,森本昌孝,油井三和:炭素鋼オーバーパックにおける腐食の局在化の検討, JNC TN8400 99-067(1999).
- 5) 伊藤伍郎:腐食科学と防食技術,コロナ社(1979).
- 6) 三井裕之,高橋里栄子,谷口直樹,大槻彰良,朝野英一,油井三和:オーバーパック溶接部 の耐食性評価に関する研究-III, JAEA-Research 2006-080 (2006).
- 7) 横山裕,三井裕之,高橋里栄子,谷口直樹,朝野英一,内藤守正,油井三和:オーバーパッ ク溶接部の耐食性評価に関する研究-IV, JAEA-Research 2008-072(2008).
- 8) 広谷卓也,小池充,武藤泉,原信義,杉本克久:地層処分環境中での炭素鋼および低合金鋼 の電気化学的性質,材料と環境,57,pp.37-45(2008).
- 9) L. Malik, L. D. Parkinson, V. Mitroyic:Scepanoyic and R. J. Brigham : Effect of weld metal composition on weld zone preferential corrosion in a 1.2% Mn steel, Proc Int Conf Offshore Mech Arct Eng,9,1 3, pp.639-646 (1990)
- 10) E. Rasanen and K. relander: Development of shipbuilding steel plate for use on arctic seas: Scandinavian Journal of Metallurgy, 7,1, pp.11-17;(1978).
- 11) K. Masamura, I. Matsushima: Grooving Corrosion of Electric Resistance Welded Steel Pipe in Water Case Histories and Effects of Alloying Elements, CORROSION/81,NACE, Paper No.75, ; (1981).
- 12) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成20年度地層処分技術調査等委託費高レベル放 射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第1分冊)-遠隔操作技 術高度化開発-(1/2)(2009).
- 13)本田明,野高昌之,鶴留浩二,井上邦博,石川博久,佐久間秀樹:炭素鋼製オーバーパックの試作,PNC TN1410 92-059(1992).
- 14) 土屋彰, 原信義, 杉本克久, 本田明, 石川博久: 模擬ベントナイト接触水環境における炭素 鋼とその構成相の不働態化特性, 材料と環境, 45, pp. 217-225 (1996).
- 15) Z. A. Foroulis and H. H. Uhlig: Effect of impurities in iron on corrosion in acids, J. Electorochem. Soc., 112, pp.1117-1181(1965).
- 16) M. Stern : The Electrochemical Behavior, Including Hydrogen Overvoltage, of Iron in Acid Environments, J. Electrochem. Soc., 102, pp.609-616 (1955).

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
巫平里	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	А			
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						
如女母 SI 表	基本単位					
和立重 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					

(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	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 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 協 方 立 体 鱼	ステラジア、/(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力, 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	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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
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	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
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 ^(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,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ				
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$
性線量当量, 個人線量当量		2.		
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

(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、ベクレルは放射性抜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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(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	
粘质	E 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 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	E 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	E 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	E クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表面電荷	ラ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	エ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 辛	ミ ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² 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	ミグレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放射 強度	E 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	E 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	たカタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エクサ	Е	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	キロ	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	У		

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	۰	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, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^{3}$ kg				

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される奴他が夫厥的に待られるもの						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	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		記号	SI 単位で表される数値		
バ	1	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	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m		
海		里	М	1 M=1852m		
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²		
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s		
ネ	-	パ	Np	ar送佐1		
ベ		ル	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.		
デ	ジベ	N	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 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =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 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ^{-2} 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ms}^{\cdot 2}$				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (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	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\boldsymbol{\nu}$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	Ŧ		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	采	カラゞ	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
÷	17		11	_	1	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
13	Ц		<i>y</i>		cal	(「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています