

JAERI-Research

2001-020



JP0150344



粒界腐食抑制型ステンレス鋼及び高Cr-W-Si系
Ni基RW合金の硝酸溶液中の伝熱面腐食の抑制効果

2001年3月

土井 正充・木内 清・矢野 昌也*・関山 喜雄*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

粒界腐食抑制型ステンレス鋼及び高 Cr-W-Si 系 Ni 基 RW 合金の硝酸溶液中の
伝熱面腐食の抑制効果

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

土井 正充・木内 清

矢野 昌也*・関山 喜雄**

(2001 年 2 月 8 日受理)

ピューレックス法を採用している再処理施設の関連機器では、硝酸の熱分解等により高酸化性状態となる沸騰伝熱状態となるため、金属構造材料の耐食性が重要な課題である。このような状態で優れた耐食性を示す金属材料の開発が要望されており、我々は再処理施設の減圧蒸発缶等を想定して、耐硝酸性に優れた合金の開発を行ってきている。減圧蒸発缶材料としては、金属組織制御により粒界腐食を抑制したステンレス鋼、ならびに Cr、W、Si の合金化により造膜反応を高めた Ni 基 RW 合金の開発している。

本研究では、再処理施設の減圧蒸発缶等を想定して、模擬硝酸環境における、伝熱面腐食を支配する環境側因子の基礎解析を行った。伝熱面腐食に及ぼす溶液中の V 濃度、熱流束の影響を抵抗加熱伝熱ロッド方式の腐食試験により調べるとともに、開発材の耐食性改善効果についても調査した。

東海研究所： 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* 現) 住友化学(株) 新居浜工場

** 現) 化研(株)

Improvement Effect on Corrosion under Heat Flux in Nitric Acid Solutions of Anti-IGC Stainless Steel
and High Cr-W-Si Ni Base RW Alloy

Masamitsu DOI, Kiyoshi KIUCHI,
Masaya YANO* and Yoshio SEKIYAMA**

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 8, 2001)

In the advanced purex reprocessing equipment, the higher corrosion resistance is required for materials because of the high corrosive environment caused from the thermodynamic decomposition of boiling nitric acid. The authors group has been developed the two types of new corrosion resistant materials for application to the reprocessing equipment. One is the type 304ULC stainless steel with controlled microstructure and decreased minor elements (EB-SAR). The other is the nickel base alloy with the ability of forming stable oxide film by addition of Cr, W and Si (RW alloy).

In this study, the heat transfer tubes applied in diminished pressure was postulated. In addition to the dominant factors of heat conducting corrosion by the nitric acid solution, the effect of the heat flux and the concentration of the corrosive vanadium ions were investigated.

Keywords: Reprocessing, Heat Transfer Tube, Stainless Steel, Nitric Acid, Corrosion, Vanadium, Heat Conducting Surface, Boiling, Intergranular Corrosion

* Niihama Works SUMITOMO Chemical Corporation

** KAKEN

目次

1. 緒言	1
2. 実験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 伝熱面腐食試験	2
2.3 粒界侵食深さの測定	2
3. 実験結果及び考察	3
3.1 伝熱面腐食速度に及ぼす V 量及び熱流束の影響	3
3.2 開発材の伝熱面腐食	3
3.3 粒界侵食深さと均一腐食	4
3.4 溶液分析から求めた腐食速度と重量減少から求めた腐食速度の相関	4
4. 結言	5
謝辞	5
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedures	2
2.1 Materials	2
2.2 Heat Conducting Corrosion Test	2
2.3 Measuring Method of Intergranular Corrosion Depth	2
3. Results and Discussion	3
3.1 Effect of Vanadium Content and Heat Flux on the Heat Conducting Corrosion	3
3.2 Heat Conducting Corrosion Behavior of Developed Materials	3
3.3 Intergranular Corrosion and General Corrosion	4
3.4 Corrosion Rate Estimated by Solution Analysis	4
4. Summary	5
Acknowledgement	5
Reference	5

This is a blank page.

1. 緒言

再処理施設の酸回収蒸発缶等の耐硝酸性が要求されるステンレス鋼製機器では、過不動態腐食が耐久性上の大きな課題となっていた¹⁾。Fig1 に減圧沸騰缶の一例を示す。最新機器には、R-SUS304ULC ステンレス鋼製の減圧蒸発缶のように、低沸点制御による硝酸環境側の防食技術が採用されている。

再処理用ステンレス鋼の耐硝酸性の基礎評価には、Huey 試験 (ASTM A262 Practice C) や Coriou 試験などの浸漬試験が一般に用いられ、材料の選定が行われてきた^{2) - 5)}。しかし、伝熱管のような沸騰伝熱条件では、硝酸の蒸発-熱分解による高酸化ポテンシャルが材料表面において形成され、中酸化剤を生成しやすい Np や Ru 等の金属イオンの共存により腐食が促進される。沸騰伝熱面腐食の検討は Cr(+6)イオン含有硝酸溶液を用いた林らの報告^{6) - 7)}があるが、伝熱沸騰面腐食に及ぼす熱流束や酸化剤生成金属イオン濃度の影響については、ほとんど検討されていない。

著者らは、過不動態腐食の抑制材として、電子ビーム溶解と加工熱処理等で粒界腐食を抑制した SUS304ULC 仕様の改良ステンレス鋼や、造膜元素を複合添加した高 Cr-W-Si 系 Ni 基 RW 合金等の開発を行ってきている^{8) - 9)}。本研究では、先ず、R-SUS304ULC ステンレス鋼について実液中の中酸化剤生成型金属イオンの影響を V で模擬した硝酸溶液を用いて、熱流束を変えて減圧沸騰伝熱面腐食試験を実施した。その結果から腐食支配因子を抽出して、保守的な伝熱面腐食試験条件を選定して、上記開発材の耐食性改善効果を比較評価した。

2. 実験方法

2.1 供試材

Table 1 に供試材の化学成分(wt%)ならびに製造プロセスを示す。各々の材料の金属組織を Fig.2 に示す。304ULC ステンレス鋼では、3種の履歴材を用いた。EB-SAR は、電子ビーム(EB)法で溶製後、熱間圧延し、加工熱処理(SAR 処理、50%冷間圧延→575℃x15hr 時効→775℃x5hr 再結晶)を施したもので、微細な金属組織を有している。Ref. Steel I は溶解時に ESR (Electro slag re-melting) 処理²⁾-³⁾を施した、最も腐食の厳しい部位に使用される再処理仕様材、Ref. Steel II は市販相当材であり、いずれも R-SUS304ULC 鋼相当の固溶化熱処理 (Mill Annealed)材である。RW 合金は、EB 溶解後に溶体化処理を施した Ni 基合金である。伝熱面腐食試験片は、各々の 8~12mm 厚の板材から ϕ 70mm x 6mm の円板を切り出し、評価面をエメリー研磨紙 1000 番まで湿式研磨した後、アセトン中で超音波洗浄し、乾燥後試験に供した。

2.2 伝熱面腐食試験

伝熱面腐食試験装置の模式図を Fig.3 に示す。試験片は底部からの加熱ロッドを介して抵抗加熱される。ガラスセル内部は、減圧器により、試験液の沸点を 65℃に制御した。試験液は、Table 2 に示す 9mol/L の模擬硝酸溶液を用いた。実液中に想定される N_p に関しては、酸化-還元電位の近い V で模擬した。V200mg/L が、実液中に含有される N_p 濃度に相当する。

腐食試験において、試験片の溶解による溶液組成の変質を防止するために、48 時間ごとに溶液更新を行うバッチ方式とした。また、各バッチ毎の腐食速度を求めるために、試験後の溶液をサンプリングして Ni イオン濃度を高周波プラズマ発光分析 (ICP) により定量分析して腐食速度を算定した。V 量、熱流束、表面温度の影響を調べる場合には、試験時間を 48 時間 x50 バッチ (累積 2400hr) とし、試験期間中の重量減量測定も併せて行った。また、腐食試験後の表面性状の変化の走査型電子顕微鏡(SEM)観察等を実施した。熱流束は、実機の最大蒸気温度と最低溶液温度の最も熱伝達の良い条件の最大を想定して、20~128kW/m² 範囲内の数条件で実施した。なお、実機の伝熱管の最大熱流束は 60kW/m² 程度であり、本試験条件の最大熱流束は実機の約 2 倍の保守的条件である。

2.3 粒界侵食深さの測定

Fig.4 に粒界侵食深さの測定方法を示す。腐食試験終了後の試験片を中央で切断し、光学顕微鏡で 200 倍にて断面観察を行った。数百個程度の粒界侵食深さを測定し、各々の材料について比較した。

3. 実験結果及び考察

3.1 伝熱面腐食速度に及ぼす V 量及び熱流束の影響

Fig.5 に伝熱面腐食速度に及ぼす V 添加量、熱流速の影響を評価した結果を示す。腐食速度は重量測定より求めた。供試鋼は Table1 に示す再処理仕様の Ref.Steel I を用いた。溶液中の V 濃度に依存した腐食速度の増加傾向が認められ、同一 V 濃度の場合、熱流束の上昇により腐食速度が増加する傾向を示した。a)は V 濃度が 50mg/L で熱流束が 20kW/m² の場合、b)は V 濃度が 200mg/L で熱流束が 128kW/m² の場合の試験片表面の写真である。Fig.5 で低い腐食速度を示した a)では表層の平滑面が残っているのに対して、高い腐食速度を示した b)では、平滑面を有する結晶粒の脱落が起こっていることが顕著に認められる。

また、重量減量は、試験時間とともに金属溶出量よりも大きくなり、脱粒支配の腐食となる傾向を示した。以前に実施した常圧や強酸化剤六価クロム添加硝酸の伝熱面腐食試験結果と比較して^{8) - 9)}、均一腐食速度の低い減圧沸騰条件では、金属溶出量に対する重量減量の比率が大きく、粒界の選択腐食傾向が一層顕著となった。

3.2 開発材の伝熱面腐食

再処理仕様鋼の伝熱面腐食が V 濃度と熱流束に依存することが明らかになったことから、開発材の耐食性の評価は、Fig.2 の b) と同じ V=200mg/L の溶液を用いて、最大熱流束 (128kW/m²) の条件で比較評価した。

Fig.6 に表面 SEM 観察結果を示す。Fig.7 に断面の光学顕微鏡観察結果を示す。市販 304ULC 鋼、再処理仕様 304ULC 鋼ともに、粒界侵食が生じている。一方、SUS304ULC 改良材 (EB-SAR) および RW 合金では、腐食試験後の表面性状も、粒界が軽微に腐食されている程度であった。SUS304ULC 改良材 (EB-SAR) では、時効-再結晶処理による、粒界偏析の低減によると考えられる腐食の抑制効果、および RW 合金では造膜作用を有する元素 (Cr, W, Si) の複合添加による防食効果⁸⁾ は、以前に実施した常圧や強酸化剤六価クロム添加硝酸の伝熱面腐食試験と同様に、酸回収蒸発缶用伝熱管の模擬液中での伝熱沸騰面においても十分に保持されると考えられる。

3.3 粒界侵食深さと均一腐食

粒界侵食が認められた市販 304ULC 鋼、再処理仕様 304ULC 鋼の 2 種について粒界侵食深さを測定した結果を Fig.8 に示す。平均の粒界侵食深さは、市販鋼で $72\mu\text{m}$ であるのに対し、再処理仕様鋼では $57\mu\text{m}$ と約 $15\mu\text{m}$ 程度小さい値を示した。また、市販鋼の侵食深さの最大値は、約 $400\mu\text{m}$ 程度であったのに対し、再処理仕様鋼では約 $200\mu\text{m}$ と約半分であった。

Fig.9 に均一腐食 (general corrosion) と粒界侵食深さの総量について比較した結果を示す。比較材と比べて、304ULC 改良材 (EB-SAR) 及び高 Cr-W-Si 系 Ni 基 RW 合金の腐食速度は、前者が数分の 1、後者が 1 桁近く低い値を示した。前者では、クロム酸化被膜の安定性低下に起因する過不動態自体の防止が困難なものの、粒界腐食抵抗性の改善により、均一腐食傾向となり、局部腐食の抑制効果により耐食性が改善されることが分かった。

3.4 溶液分析から求めた腐食速度と重量減少から求めた腐食速度の相関

Fig.10 に開発材および比較材の Ni 溶出量から求めた腐食速度の時間変化を示す。304ULC 鋼では、いずれも試験時間の増加に伴い、腐食速度は上昇するが、304ULC 改良材 (EB-SAR) で約 10 バッチ (480hr) 程度、再処理仕様 304ULC 鋼で約 30 バッチ (1440hr) 程度、市販鋼で約 40 バッチ (1920hr) 程度で溶出速度は均一となった。RW 合金では、50 バッチ (2400hr) までほぼ一定の低い溶出速度を示した。

Fig.11 に試験最終バッチにおける溶出 Ni イオン濃度から求めた腐食速度と重量減少から求めた腐食速度の関係を示す。再処理仕様 304ULC 鋼 (Ref.steel I)、市販 304ULC 鋼 (Ref.steel II) は、脱粒支配の腐食が生じるために、重量減少から求めた腐食速度が大きくなるが、均一腐食傾向を示した 2 種の開発鋼では溶液分析から求めた腐食速度と重量減少から求めた腐食速度がよく一致する。

現行材では脱粒を伴う加速傾向の腐食が起こるので寿命予測には、十分な試験データの蓄積と高度な数値解析を用いる必要とするが、開発材のような均一腐食を示す材料では、溶液分析による腐食量のモニタリングが可能であり、寿命予測が容易であると考えられる。

4. 結言

本研究では、再処理硝酸の廃液処理工程に使用する減圧蒸発缶において最も重要な課題となっている伝熱面腐食抵抗性の観点から実環境の腐食加速因子を検討し、これまでに開発してきた SUS304ULC の EB-SAR 処理鋼、高 Cr-W-Si 系 Ni 基 RW 合金に関して、再処理仕様の R-SUS304ULC 鋼（市販材）と比較評価試験を行い、以下の点を明らかにした。

- (1) 市販鋼では、減圧沸騰条件においても、中酸化剤生成元素の V 等の濃度及び熱流束等の熱流動条件に依存して、粒界腐食－脱粒支配の伝熱面特有の時間漸増型腐食が起こる。
- (2) 開発鋼では、均一腐食挙動を示し、粒界腐食は認められなかった。
- (3) EB-SAR 処理鋼の腐食速度は、市販鋼の腐食速度の数分の 1，RW 合金は一桁以下の優れた耐食性を示した。304ULC 鋼における SAR 処理の有効性および Ni 基合金における不働態被膜の安定化元素 (Cr, W, Si) の添加の有効性が伝熱面腐食抑制の観点から確認され、長期耐久性が担保できると考えられる。
- (4) 均一腐食で支配される SUS304ULC の EB-SAR 処理鋼、高 Cr-W-Si 系 Ni 基 RW 合金では、寿命予測や、試験期間中の腐食速度を溶液分析によるモニタリングが容易であると考えられる。

謝辞

本研究の遂行に当たり、東海研究所工作課の津田和美氏には試験片の加工・作製において協力していただきました。また、耐食材料研究グループの方々ならびに化研（株）の加藤裕二氏、安嶋武志氏には試験遂行において協力を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 木内；日本原子力学会誌 Vol.31 No.2 p229-238 (1989)
- 2) Y. Yanokura et.al; Proceeding of International Conference of RECOD 94 Vol 3 (1994)
- 3) 木村ら；CAMP ISIJ vol.5 p2016 (1992)
- 4) 稲積ら；NKK 技報 No.144 p20-25 (1993)
- 5) M.Mayuzumi et.al; Corrosion Vol.56, No.1 p71-79 (2000)
- 6) 林ら；腐食防食講演集 A-310 p113-116 (1991)
- 7) 林ら；第 39 回腐食防食討論会講演集 C-209 p339-342 (1992)
- 8) K.Kiuchi et.al; Proceeding of International Conference of RECOD 91, p1-6 (1991)
- 9) K.Kiuchi et.al; Proceeding of International Conference of RECOD 98 p859-867 (1998)

Table 1 Chemical composition of the materials used (wt%)

No.			C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Others	Refining Process	Heat Treatment
EB-SAR	R-SUS304ULC	Developed	0.015	0.14	0.10	12.7	19.3	Bal.	0.26Ti	EB	SAR*
Ref.Steel I		Super grade	0.011	0.34	1.71	10.8	19.0	Bal.		ESR	MA**
Ref.Steel II		Conventional	0.014	0.40	1.07	10.4	19.7	Bal.		Conventional.	MA
RW alloy	Ni base	Developed	0.005	2.70	0.10	Bal.	30.1	Tr.	10W	EB	ST***

* SAR Strained Aged Recrystallized

** MA Mill Annealed

*** ST Solution Treatment

Table 2 Composition of the Nitric acid solution used

	中酸化剤生成イオン		その他内容物		HNO ₃
	TRU	FP	Fe(+3)	Cr(+3)	
実機想定溶液	900 mg/L-Np(+6)	白金族元素	1200 mg/L	300 mg/L	9mol/L
模擬試験溶液	200 mg/L-V(+5)	5 mg/L-Ru(+3)	同上	同上	同上

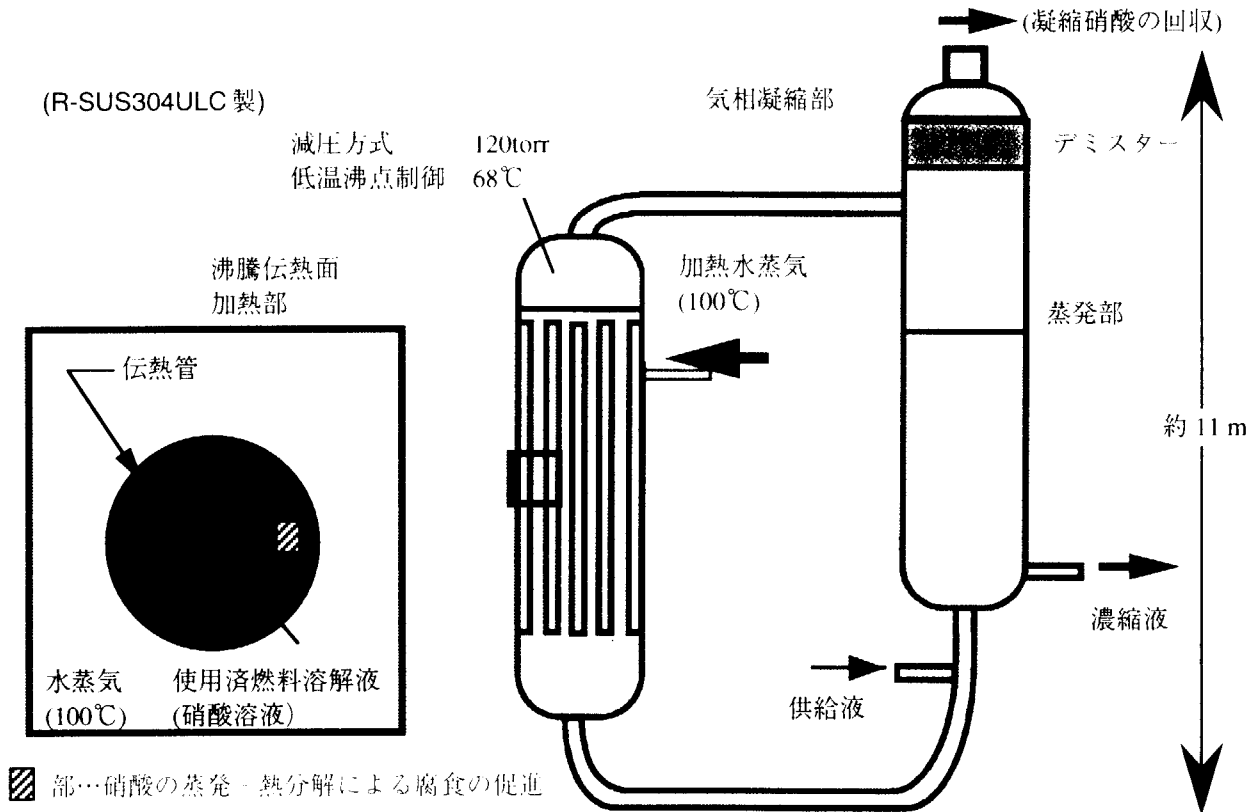


Fig.1 Schematic view of the nitric acid recovery evaporator

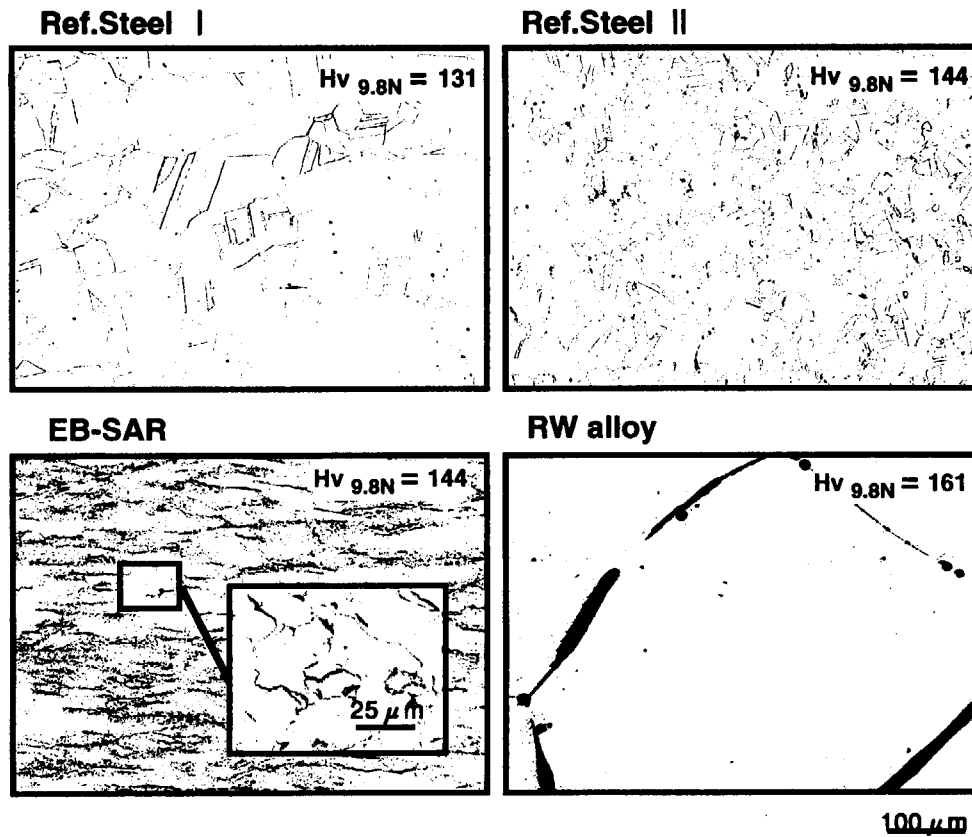


Fig.2 Microstructure and Vickers's hardness($Hv_{9.8N}$) of the specimen materials

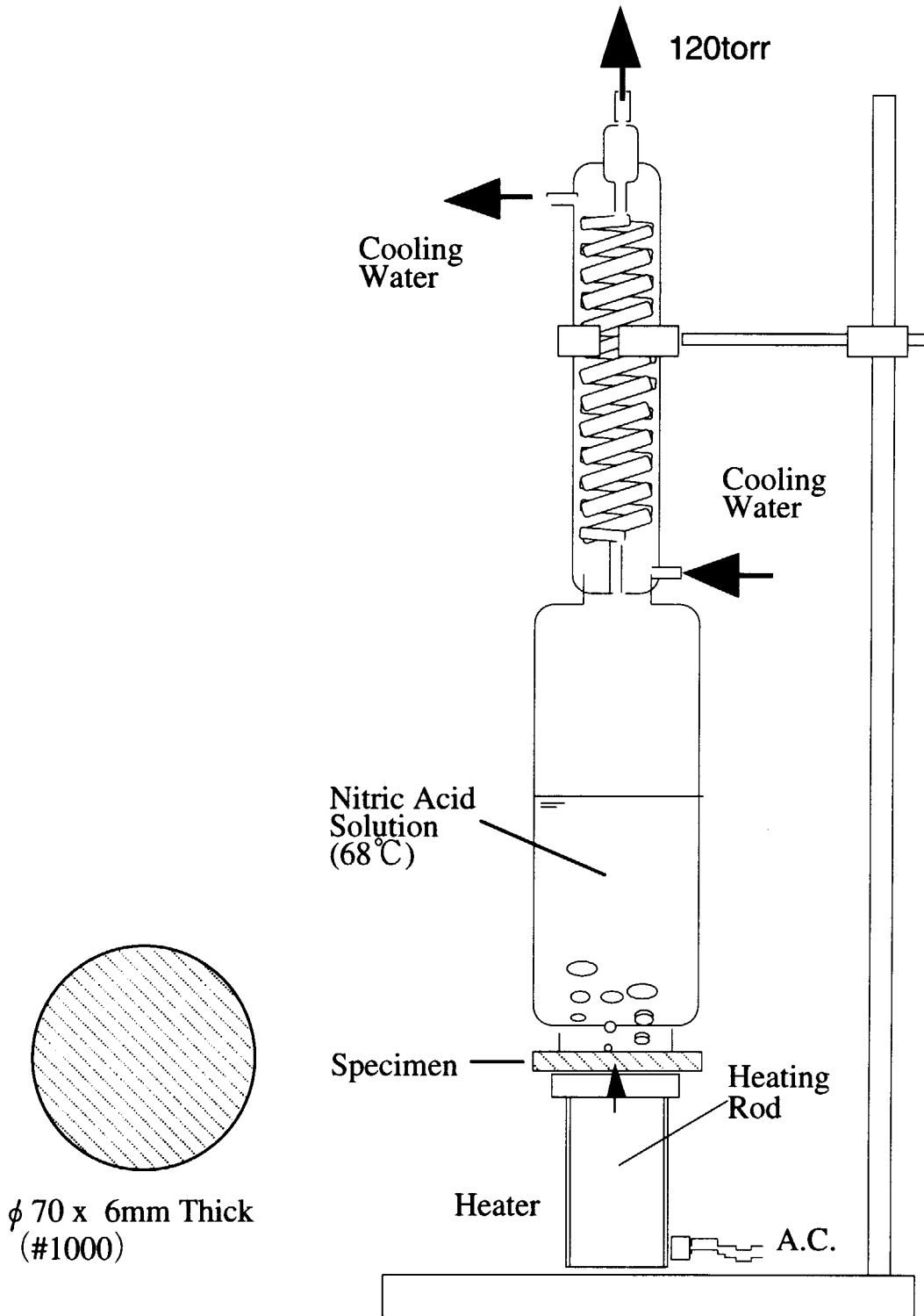


Fig.3 Schematic view of the corrosion test apparatus

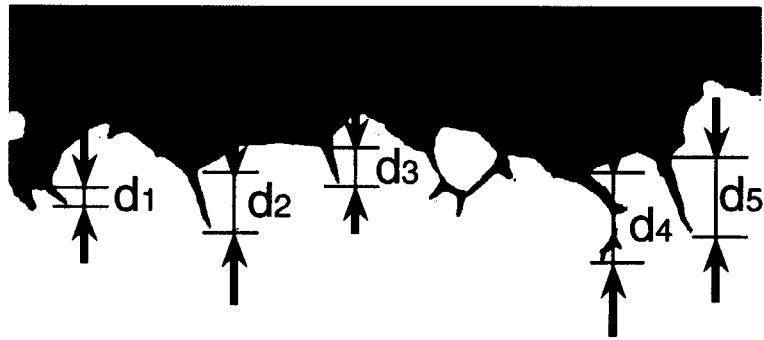


Fig.4 Measuring method of the intergranular corrosion depth:dn

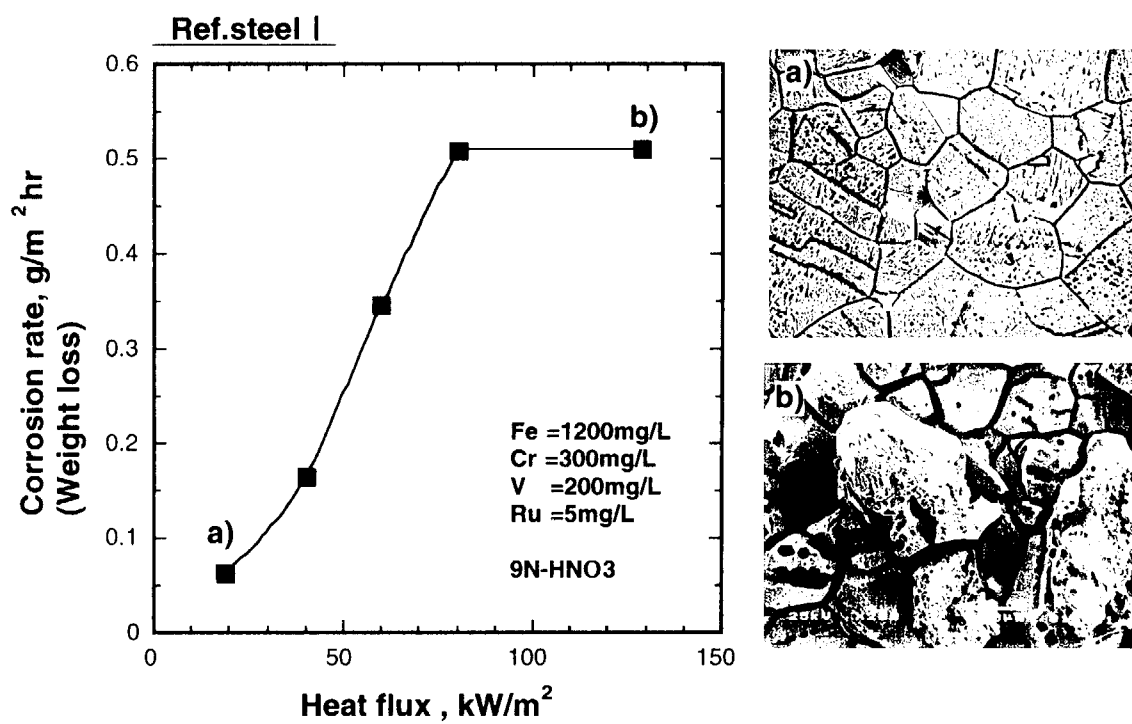


Fig.5 Effect of heat flux and vanadium content on the corrosion rate (Ref.steel I)

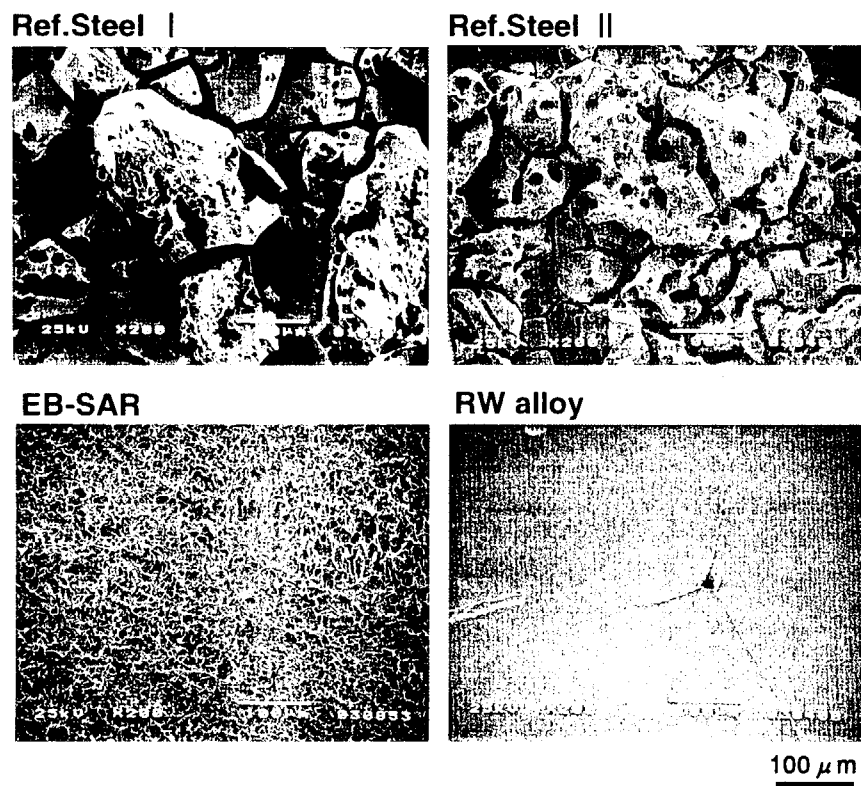


Fig.6 SEM photographs of the specimen surface after the corrosion tests

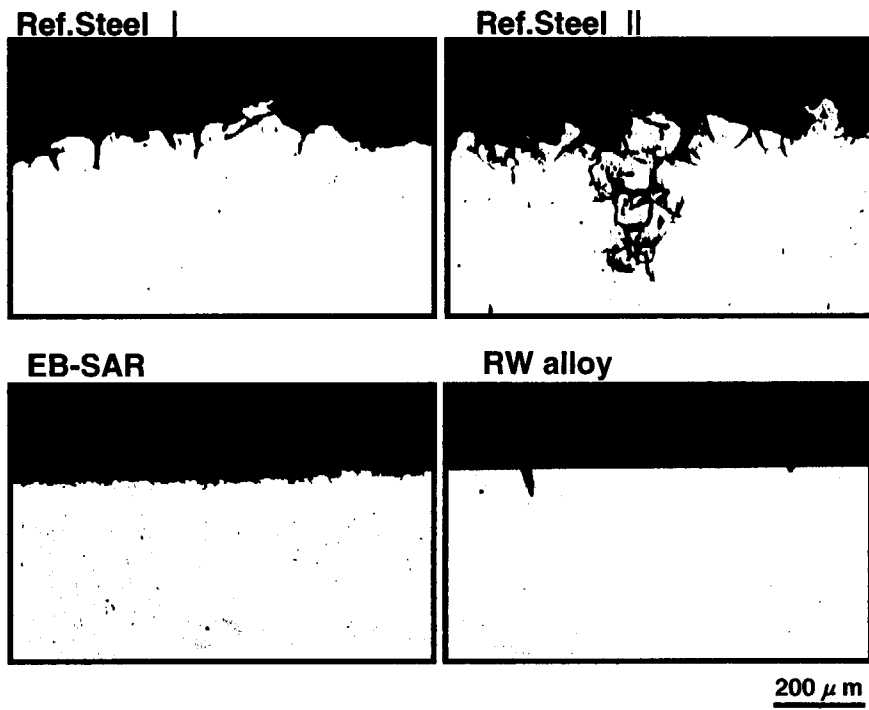


Fig. 7 Cross-sectional photographs of the specimen after the corrosion tests

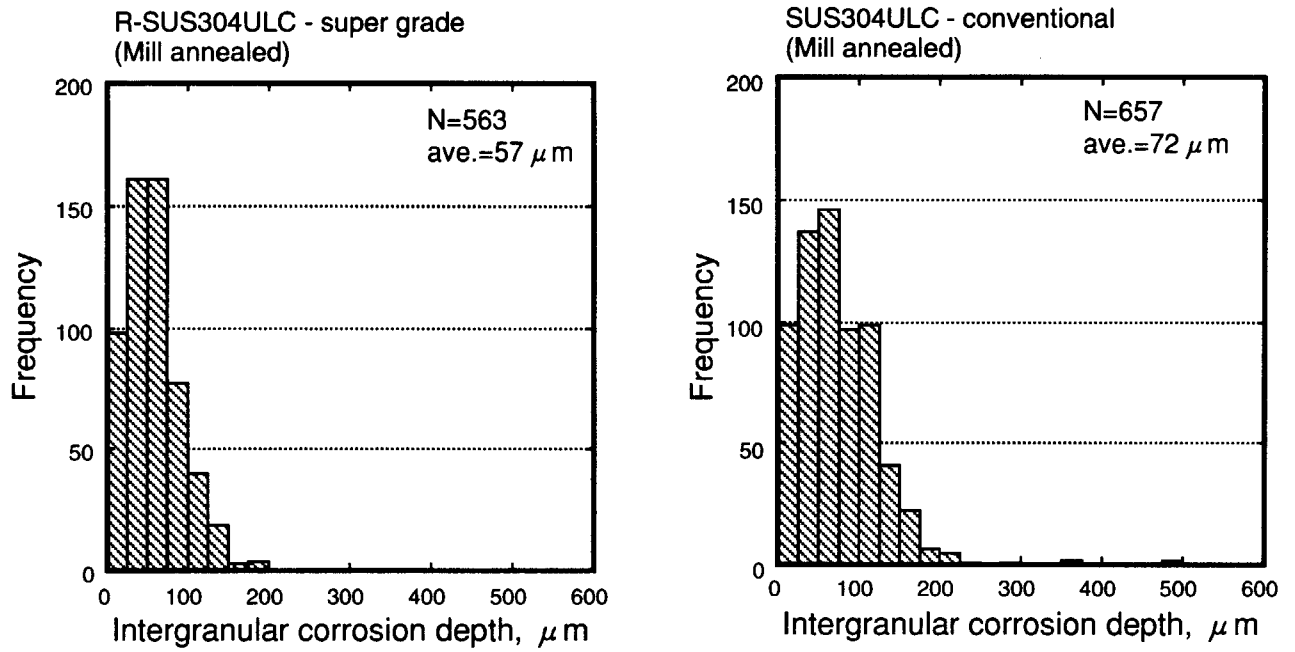


Fig.8 Histograms of the intergranular corrosion depth

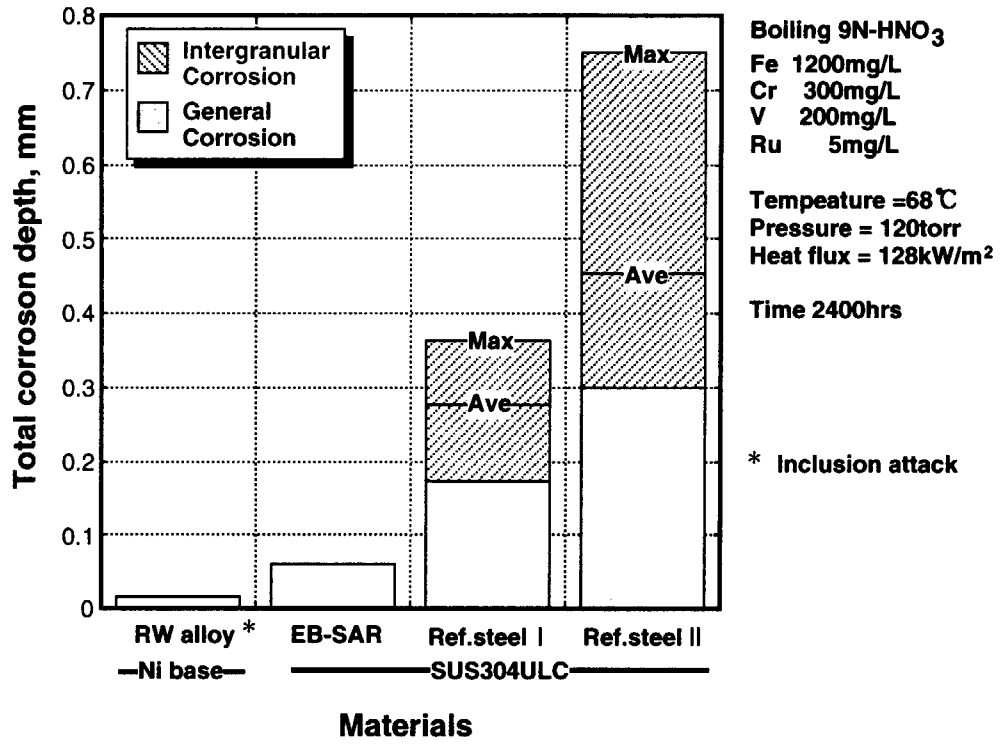


Fig. 9 Total corrosion depth of the specimen after the corrosion tests (2400hrs)

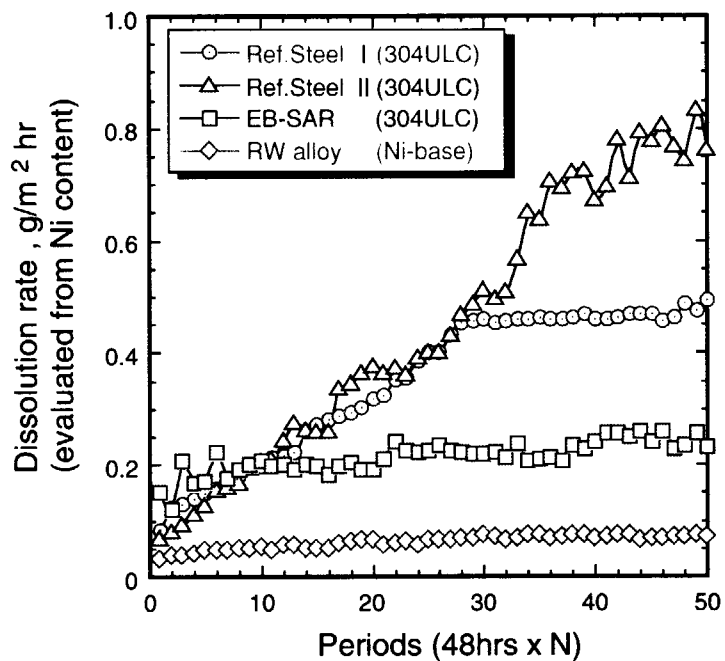


Fig.10 Time dependence of the corrosion rate evaluated by the nickel content dissolved in the solution

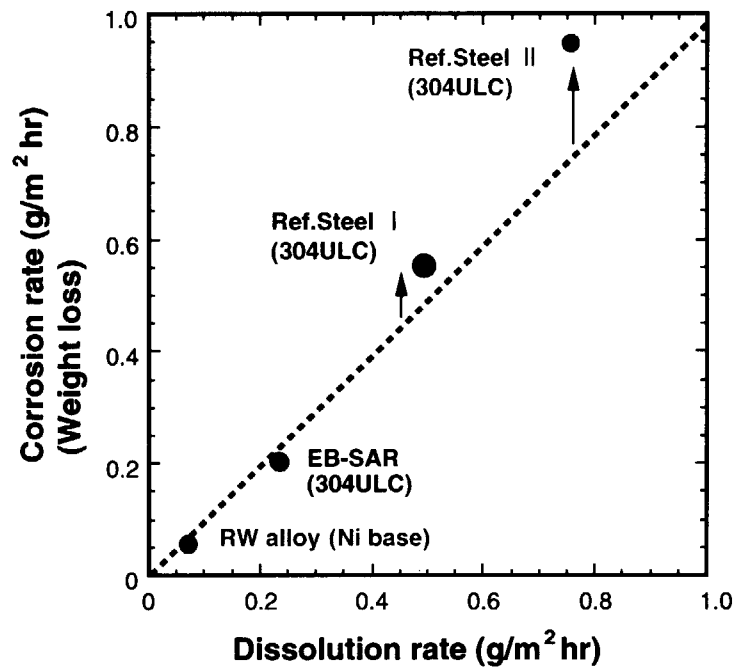


Fig.11 Relationship between dissolution rate and corrosion rate

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C関係理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10¹St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ¹	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻¹	1.35951×10 ⁻¹	1.31579×10 ⁻¹	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁷	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ¹⁹	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ²⁶	3.82743×10 ²⁰	1.51857×10 ²²	1.18171×10 ¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
= 4.184J (熱化学)
= 4.1855J (15°C)
= 4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

粒界腐食抑制型ステンレス鋼及び高CrWSi系Ni基RW合金の硝酸溶液中の伝熱面腐食の抑制効果