

**JAERI-Tech**  
**96-051**



JP9701017



# Ni-Cr-W系超耐熱合金の大気中高温酸化特性

1996年11月

鈴木富男・新藤雅美

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開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（〒319-11 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公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)高野高速印刷

Ni-Cr-W系超耐熱合金の大気中高温酸化特性

日本原子力研究所東海研究所材料研究部

鈴木 富男・新藤 雅美

(1996年10月22日受理)

高温ガス炉技術の高度化の一環として開発を進めている高性能高温構造材料のNi-Cr-W系超耐熱合金を、核熱利用システムの構造材等のより広い工業分野に有効利用するためには、大気中のような酸化性雰囲気中における酸化挙動に関する十分な知見が必要となる。酸化性雰囲気中での酸化特性データを取得することを目的として、最適化組成の工業規模溶製材及び本合金の骨格組成決定に用いたW/Cr比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金について、大気中での高温酸化試験を、ハステロイXRを比較材として実施し、以下の結論を得た。

- (1) 最適化組成の工業規模溶製材であるNi-Cr-W系超耐熱合金の大気中の耐酸化性はハステロイXRより優れている
- (2) 最適化組成の工業規模溶製材であるNi-Cr-W系超耐熱合金のCr含有量19%は大気中においても最も安定した酸化特性を示す合金組成である。

High Temperature Oxidation Characteristics of Developed Ni-Cr-W Superalloys in Air

Tomio SUZUKI and Masami SHINDO

Departments of Materials Science and Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 22, 1996)

For expanding utilization of the Ni-Cr-W superalloy, which has been developed as one of new high temperature structural materials used in the advanced High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGRs), in various engineering fields including the structural material for heat utilization system, the oxidation behavior of this alloy in air as one of high oxidizing environments becomes one of key factors. The oxidation tests for the industrial scale heat of Ni-Cr-W superalloy with the optimized chemical composition and five kinds of experimental Ni-Cr-W alloys with different Cr/W ratio were carried out at high temperatures in the air compared with Hastelloy XR. The conclusions were obtained as follows.

- (1) The oxidation resistance of the industrial scale heat of Ni-Cr-W superalloy with the optimized chemical composition was superior to that of Hastelloy XR.
- (2) The most excellent oxidation resistance was obtained in an alloy with 19% Cr of the industrial scale heat of Ni-Cr-W superalloy.

Keywords : Ni-Cr-W Superalloy, HTGR, HTTR, Oxidation, Hastelloy XR, High Temperature,  
Structural Materials

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 実験方法 .....	2
2.1 試験材料 .....	2
2.2 実験条件 .....	3
3. 実験結果 .....	3
3.1 最適化組成の工業規模溶製材の酸化挙動 .....	3
3.2 Cr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金の酸化挙動 .....	5
4. ま と め .....	8
参考文献 .....	8

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Method .....	2
2.1 Materials .....	2
2.2 Test Conditions .....	3
3. Experimental Results .....	3
3.1 Oxidation Behavior of Industrial Scale Heat of Ni-Cr-W Superalloy .....	3
3.2 Oxidation Behavior of Five Kinds of Experimental Ni-Cr-W alloys .....	5
4. Conclusions .....	8
References .....	8

# 1. 緒 言

高温ガス炉技術の高度化の一環として、高性能高温構造材料用のNi-Cr-W系超耐熱合金の開発を、高温ガス炉研究委員会超耐熱合金専門部会（部会長：田中良平東京工業大学名誉教授）に諮りつつ進めてきた。大気中のクリープ破断特性、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の耐酸化性、熱間加工性等に均衡がとれた特性を示す合金として、Ni-18～19Cr-20～22W-0.3C-0.08Ti-0.02～0.05Zr-0.002～0.007Y-0.0035～0.006B（mass %）の最適化組成合金を提案した [1]。この提案組成合金を工業規模（2トン）で溶製し、熱交換器用伝熱管を想定した継ぎ目無し管の試作にも成功した。工業規模の溶製材についても、上記の特性試験を継続中であるが、十分に満足すべき実用材料としての結果が得られている [2]。さらに、この合金に関しては、溶接用溶加材の開発を行い、基礎的知見が蓄積されてきている [3]。

本合金はHe/He中間熱交換器用構造材として開発を進めてきた経緯から、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での耐酸化性が、高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature Engineering Test Reactor）の高温部構造材であるハステロイXRと同等以上という開発目標があり、最適化組成の工業規模溶製材はその目標を達成し、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中ではハステロイXR以上の耐酸化性を有していた [2,4]。一方、1000℃の大気中の予備的試験では、最適化組成の工業規模溶製材の耐酸化性は、ハステロイXRと比較して、被膜の密着性は優れているが、酸化量は多いという結果が得られている [4]。

核熱利用システムの構造材等より広い分野において、本合金の有効利用を図るには、大気中のような酸化性雰囲気を含めた広範囲の実用環境における酸化挙動に関する知見が必要になる。

そこで、本試験は、最適化組成の工業規模溶製材及びクロム含有量の妥当性を調べるため本合金の骨格組成決定に用いたCr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金（第1次溶製材） [5,6] について、大気中の高温酸化試験をハステロイXRを比較材として実施し、当該合金の酸化性雰囲気中での酸化特性データを取得することを目的とした。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験材料

#### (1) 最適化組成の工業規模溶製材

工業規模溶製したNi-Cr-W系超耐熱合金及び比較材として用いたHTTR実機同一ヒー  
トの Hastelloy XR の化学組成及び固溶化熱処理条件を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions (mass%) and heat treatment conditions of industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Co	Mo
Ni-Cr-W	0.03	0.06	0.02	0.003	0.001	18.76	0.02	-
Hastelloy XR	0.028	0.34	0.88	0.001	0.001	21.82	0.03	9.04
	W	Fe	B	Al	Ti	Y	Zr	Ni
Ni-Cr-W	21.43	0.07	0.006	0.04	0.06	0.009	0.02	Rem.
Hastelloy XR	0.49	18.05	0.002	<0.01	<0.01	-	-	Rem.

Ni-Cr-W : 1225°C × 1 h Water Quenching (WQ)

Hastelloy XR : 1190°C × 1 h WQ

#### (2) Cr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金

Cr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金、すなわち28Cr/15W合金 (No.1)、24Cr/18W合金 (No.2)、20Cr/21W合金 (No.3)、16Cr/24W合金 (No.4) 及び12Cr/27W合金 (No.5) の化学組成の詳細及び固溶化熱処理条件を Table 2 に示す。

Table 2 Chemical compositions (mass%) and heat treatment conditions of five kinds of experimental Ni-Cr-W alloys.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Co
No.1	0.026	0.30	1.00	0.003	0.003	28.03	15.01	0.01
No.2	0.024	0.26	0.96	0.002	0.003	23.91	18.22	0.01
No.3	0.013	0.30	0.98	0.002	0.002	20.10	21.16	0.01
No.4	0.017	0.33	1.16	0.001	0.003	16.42	23.72	0.01
No.5	0.012	0.32	1.18	0.002	0.002	11.99	27.44	0.01
	Fe	B	Al	Ti	Zr	Nb	Ta	Ni
No.1	0.13	0.0008	0.004	0.24	0.03	<0.01	0.001	Rem.
No.2	0.14	0.0008	0.002	0.23	0.02	<0.01	0.001	Rem.
No.3	0.14	0.0007	0.003	0.23	0.03	<0.01	0.001	Rem.
No.4	0.11	0.0002	0.003	0.18	0.02	<0.01	0.001	Rem.
No.5	0.17	0.0001	0.004	0.22	0.03	<0.01	0.001	Rem.

No.1 : 1275°C × 1 h Water Quenching (WQ)

No.2 : 1300°C × 1 h WQ

No.3~No.5 : 1325°C × 1 h WQ

試験片のサイズは、全て7 mm×15mm×2mmの板状試験片とし、試験片表面は湿式エメリー研磨 (20 μm) 仕上げとした。

## 2.2 実験条件

### (1) 最適化組成の工業規模溶製材

950, 1000及び1050℃の大気中で、工業規模溶製材 (Ni-Cr-W系超耐熱合金) 及びハステロイXRの2合金について各温度で250、500、750及び1000時間までの1シリーズ合計4個の試料を用いた等温酸化試験を行った。

### (2) Cr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金

1000℃の大気中で、Cr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金の330、660及び1000時間までの1シリーズ合計3個の試料を用いた等温酸化試験を行った。

さらに、(1)のNi-Cr-W系超耐熱合金及びハステロイXRも比較のためこの一連の試験に加えた。

なお、全ての試験で1試験条件1試験片で試験片の継続使用はしていない。

酸化試験後の試験片は、酸化膜の剥離の有無を確認するための表面観察、重量測定及び酸化膜断面観察による酸化膜厚測定を実施した。

## 3. 実験結果

### 3.1 最適化組成の工業規模溶製材の酸化挙動

#### (1) 重量変化

950, 1000及び1050℃で各時間酸化後のNi-Cr-W系超耐熱合金及びハステロイXRの試験片の表面状態をFig. 1に示す。ハステロイXRは全ての試験温度及び試験時間で剥離が観察されたが、Ni-Cr-W系超耐熱合金では1050℃の1000時間以外は著しい剥離は観察されなかった。950, 1000及び1050℃の各酸化時間後の剥離した酸化膜の量を無視した試験片だけの重量変化量 (見かけの重量変化量) をまとめたものがTable 3である。

Table 3 Mass change of oxidized specimens of industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys (mg/cm<sup>2</sup>).

Alloy	Temperature (°C)	Time (h)			
		250	500	750	1000
Ni-Cr-W	950	0.544	0.789	0.822	0.824
	1000	0.626	1.010	1.194	1.230
	1050	1.650	1.372	1.863	-1.463
Hastelloy XR	950	0.812	0.567	-0.309	-0.597
	1000	0.623	-0.362	-1.385	-1.268
	1050	-1.209	-1.873	-2.142	-2.458



950, 1000及び1050℃の各温度での見かけの重量変化量の時間変化曲線をFig. 2~4に示す。ハステロイXRは酸化膜の剥離による重量減少のため両合金の耐酸化性の比較はできないが、酸化膜の密着性はNi-Cr-W系超耐熱合金の方が優れているようである。

(2) 酸化膜厚測定及び膜厚から求めた重量増加量

両合金の耐酸化性を調べるため、酸化の初期から剥離が無く健全と思われる部分の酸化膜の膜厚を測定した結果をTable 4に示す。

Table 4 Scale thickness of oxidized industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys ( $\mu\text{m}$ ).

Alloy	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Time (h)			
		250	500	750	1000
Ni-Cr-W	950	3.3	6.8	5.8	5.8
	1000	4.5	8.0	7.5	12.5
	1050	10.5	11.8	14.2	11.6
Hastelloy XR	950	6.5	9.8	6.8	11.4
	1000	7.0	7.8	9.0	12.0
	1050	8.8	10.3	11.3	15.3

Table 4の酸化膜の厚さから酸化膜の剥離を加味した全体の重量増加量を求めた。全体の重量増加量を計算するために、両合金上に形成された酸化膜は100% $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 及び試験片の重量変化に寄与する元素は酸素だけと仮定した。酸化物の量は、酸化膜厚をその酸化物の密度で割れば求められる。

$$\text{酸化物の量}(\text{mg}/\text{cm}^2) = \text{膜厚} / \text{酸化物の密度}(5.283\text{g}/\text{cm}^3) \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

重量増加量 (酸化物中の酸素の量)

$$= \text{酸化物の量} \times \{(3 \times \text{酸素の原子量}) / (2 \times \text{クロムの原子量} + 3 \times \text{酸素の原子量})\} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

このようにして求めた酸化物中の酸素の量が試験片の全体の重量増加量に相当する。950, 1000及び1050℃の1000時間までの酸化膜厚さから求めた全体の重量増加量をまとめたものがTable 5である。

Table 5 Mass gain calculated from scale thickness of oxidized industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

Alloy	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Time (h)			
		250	500	750	1000
Ni-Cr-W	950	0.556	1.146	0.980	0.980
	1000	0.757	1.350	1.264	2.114
	1050	1.776	1.989	2.401	1.962
Hastelloy XR	950	1.100	1.660	0.978	1.930
	1000	1.190	1.320	1.518	2.019
	1050	1.484	1.742	1.907	2.583

950, 1000及び1050℃の各温度での全体の重量増加量の時間変化曲線をFig. 5～7に示す。950℃ではNi-Cr-W系超耐熱合金の酸化速度はハステロイXRに比較して明らかに遅いが、1000及び1050℃では両合金の顕著な差は無いと言える。

### (3) 酸化膜の剥離量

酸化膜の剥離量は、酸化膜厚さから求めた全体の重量増加量 (Table 5) から見かけの重量変化量 (Table 3) を差し引いた値であり、950, 1000及び1050℃の各酸化時間後の酸化膜の剥離量をまとめたものがTable 6である。

Table 6 Mass of oxide spalled from scales formed on industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys (mg/cm<sup>2</sup>).

Alloy	Temperature (°C)	Time (h)			
		250	500	750	1000
Ni-Cr-W	950	0.012	0.357	0.158	0.156
	1000	0.131	0.340	0.070	0.884
	1050	0.126	0.617	0.538	3.425
Hastelloy XR	950	0.288	1.093	1.287	2.527
	1000	0.567	1.682	2.903	3.287
	1050	2.693	3.615	4.049	5.041

950, 1000及び1050℃の各温度での酸化膜の剥離量の時間変化曲線をFig. 8～10に示す。これらの図からも明らかなように、Ni-Cr-W系超耐熱合金の酸化膜の密着性はハステロイXRに比較して格段に優れている。ただし、高温で長時間酸化すると(1050℃の1000時間)、ハステロイXRよりは剥離量は少ないものの、剥離は顕著になる。

### (4) Ni-Cr-W系超耐熱合金とハステロイXRの酸化挙動の比較

酸化速度に関しては、950℃ではNi-Cr-W系超耐熱合金の方が遅い、すなわち耐酸化性は優れていたが、1000及び1050℃ではほぼ同程度であった。酸化速度の観点からは、Ni-Cr-W系超耐熱合金の耐酸化性はハステロイXRと同等以上と見ることができる。一方、酸化膜の密着性に関しては、Ni-Cr-W系超耐熱合金の方が格段に優れていた。今回の実験では、酸化速度と酸化膜の密着性の相関性は見られなかったが、酸化膜の剥離が主に一定時間酸化後の冷却過程で生じるものとする、今回の実験のような等温酸化試験で、かつ1試験条件1試験片では、酸化膜の剥離の影響はでにくい。しかし、一般的には、酸化膜の剥離によって次の酸化が加速されるため、酸化膜の密着性は酸化速度に大きな影響を与える。

以上のことから、大気中でもNi-Cr-W系超耐熱合金の耐酸化性はハステロイXRより優れていると結論される。

## 3.2 Cr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金の酸化挙動

### (1) 重量変化

1000℃で各時間酸化した後の全ての試験片の表面状態をFig. 11に示す。工業規模溶

製材のNi-Cr-W系超耐熱合金以外に剥離が観察された。1000℃の各酸化時間後の剥離した酸化膜の量を無視した試験片だけの重量変化量（見かけの重量変化量）をまとめたものがTable 7である。

Table 7 Mass change of oxidized five kinds of experimental Ni-Cr-W alloys, industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

Alloy	Cr(%)	Time (h)		
		330	660	1000
No.1	28.03	-2.752	-2.828	-3.729
No.2	23.91	1.146	-1.004	-3.347
No.3	20.10	0.985	0.693	1.040
No.4	16.42	0.718	1.148	-1.351
No.5	11.99	-15.148	-69.495	-108.042
Ni-Cr-W	18.76	1.141	1.365	1.230
Hastelloy XR	21.82	0.131	-0.855	-1.268

各酸化時間における見かけの重量変化量をCr含有量で整理した結果をFig. 12に示す。Ni-Cr-W系超耐熱合金及びハステロイXRも含めてCr含有量が少なくても多くても、酸化膜の剥離によると思われる重量減少を示した。

(2) 酸化膜厚測定及び膜厚から求めた重量増加量

1000℃の各酸化時間後の酸化膜厚さの測定結果をまとめたものがTable 8である。

Table 8 Scale thickness of five kinds of experimental Ni-Cr-W alloys, industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys ( $\mu\text{m}$ ).

Alloy	Cr(%)	Time (h)		
		330	660	1000
No.1	28.03	8.3	13.8	13.0
No.2	23.91	9.8	13.5	14.6
No.3	20.10	10.5	11.5	14.5
No.4	16.42	10.5	11.6	14.9
No.5	11.99	86.6	270.5	400.9
Ni-Cr-W	18.76	7.5	7.7	12.5
Hastelloy XR	21.82	8.3	8.0	12.0

3. 1 (2)と同様にして酸化膜厚さから求めた酸化膜の剥離も加味した全体の重量増加量をまとめたものがTable 9である。

Table 9 Mass gain calculated from scale thickness of oxidized five kinds of experimental Ni-Cr-W alloys, industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

Alloy	Cr(%)	Time (h)		
		330	660	1000
No.1	28.03	1.403	2.331	2.201
No.2	23.91	1.656	2.275	2.456
No.3	20.10	1.775	1.944	2.448
No.4	16.42	1.775	1.960	2.520
No.5	11.99	14.670	45.800	67.875
Ni-Cr-W	18.76	1.262	1.290	2.110
Hastelloy XR	21.82	1.403	1.350	2.019

各酸化時間における全体の重量増加量をCr含有量で整理した結果をFig. 13に示す。12%CrのNo.5合金の除いて全体の重量増加量に大きな差はなく、Ni-Cr-W系超耐熱合金及びハステロイXRも含めてCr含有量が16%以上であればある程度の耐酸化性は確保でき、Cr含有量に依存しない。

### (3) 酸化膜の剥離量

酸化膜の剥離量は、酸化膜厚さから求めた全体の重量増加量 (Table 9) から見かけの重量変化量 (Table 7) を差し引いた値であり、各酸化時間後の酸化膜の剥離量をまとめたものがTable 10である。

Table 10 Mass of oxide spalled from scales formed on five kinds of experimental Ni-Cr-W alloys, industrial scale Ni-Cr-W and Hastelloy XR alloys ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

Alloy	Cr(%)	Time (h)		
		330	660	1000
No.1	28.03	4.155	5.159	5.930
No.2	23.91	0.510	3.279	5.803
No.3	20.10	0.790	1.251	1.408
No.4	16.42	1.057	0.812	3.871
No.5	11.99	29.818	115.295	175.917
Ni-Cr-W	18.76	0.121	-0.075	0.880
Hastelloy XR	21.82	1.272	2.205	3.287

各酸化時間における酸化膜の剥離量をCr含有量で整理した結果をFig. 14に示す。12%とCr含有量が少ないNo.1は勿論のこと、19~20%を最小にして酸化膜の剥離量はCr含有量の増加に伴って多くなる。

#### (4) 酸化挙動に及ぼすCr含有量の影響

酸化膜の密着性も考慮に入れた酸化挙動は、Cr含有量が19~20%の合金、すなわちNo.3及び工業規模溶製材のNi-Cr-W系超耐熱合金が最も安定した特性を示した。

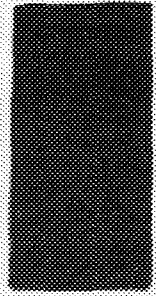
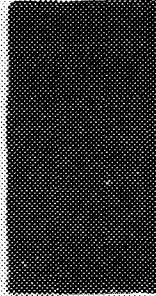
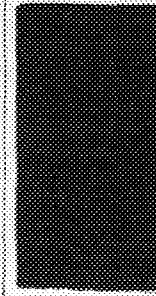
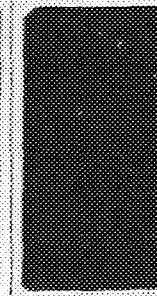
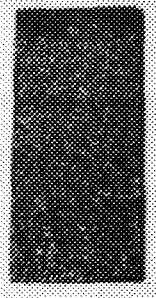
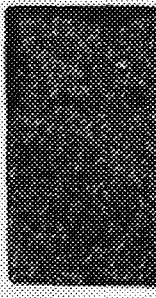
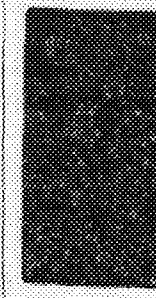
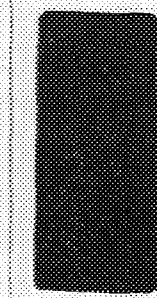
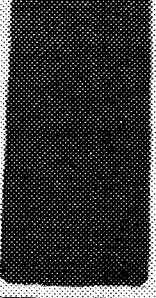
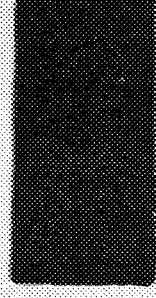
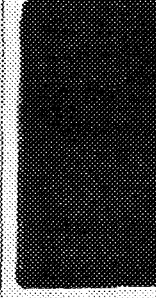
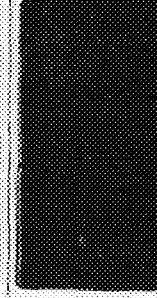
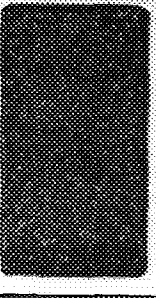
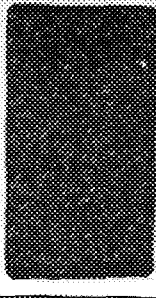
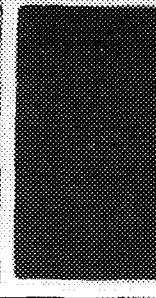
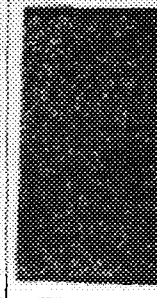
## 4. まとめ

開発を進めてきた高性能高温構造材料用のNi-Cr-W系超耐熱合金について、酸化性雰囲気中での酸化特性データを取得することを目的として、高温ガス炉用最適化組成の工業規模溶製材及び本合金の骨格組成決定に用いたCr/W比の異なる5種類のNi-Cr-W系実験合金についての大気中での高温酸化試験を、ハステロイXRを比較材として実施し、以下の結論を得た。

- (1) 最適化組成の工業規模溶製材であるNi-Cr-W系超耐熱合金の大気中での耐酸化性はハステロイXRより優れている。
- (2) 最適化組成の工業規模溶製材であるNi-Cr-W系超耐熱合金のCr含有量19%は大気中においても最も安定した酸化特性を示す合金組成である。

## 参考文献

- [1] 高温ガス炉研究委員会超耐熱合金専門部会：JAER-M 92-137 (1992)
- [2] H. Tsuji et al. : Proc. of Int. Conf. on Materials for Advanced Power Engineering, p.939 (1994)
- [3] Y. Kurata et al. : JAERI-Conf 96-010, p.353 (1996)
- [4] T. Suzuki et al. : JAERI-Research 95-088 (1996)
- [5] 高温ガス炉研究委員会超耐熱合金専門部会：JAER-M 88-270 (1989)
- [6] 塚田 隆 他：JAERI-M 88-264 (1989)

Temp. (°C)	Alloy	Time (h)			
		250	500	750	1000
950	Ni-Cr-W				
	Hastelloy XR				
1000	Ni-Cr-W				
	Hastelloy XR				

5 mm

Fig. 1 (1) Surfaces of specimens oxidized at 950 and 1000°C.

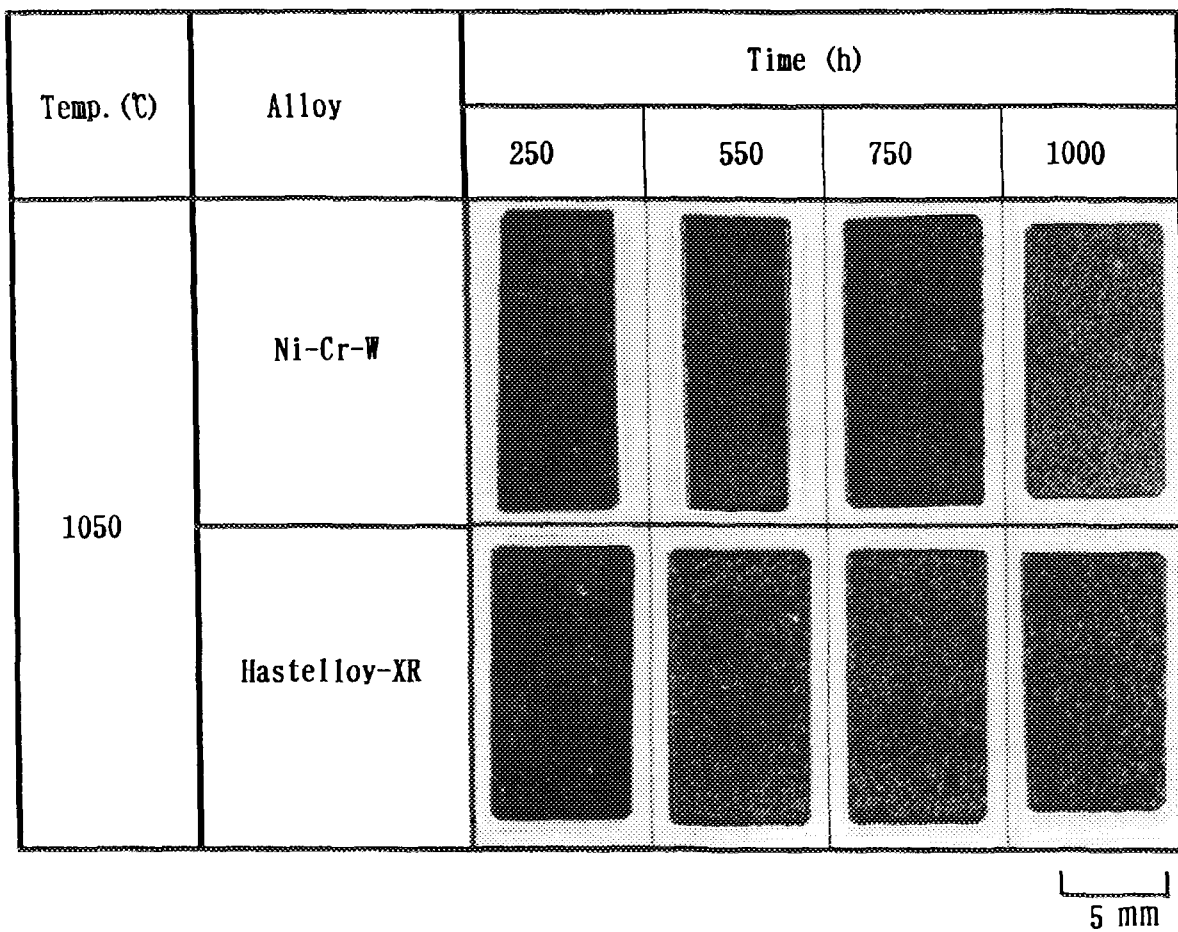


Fig. 1 (2) Surfaces of specimens oxidized at 1050°C.

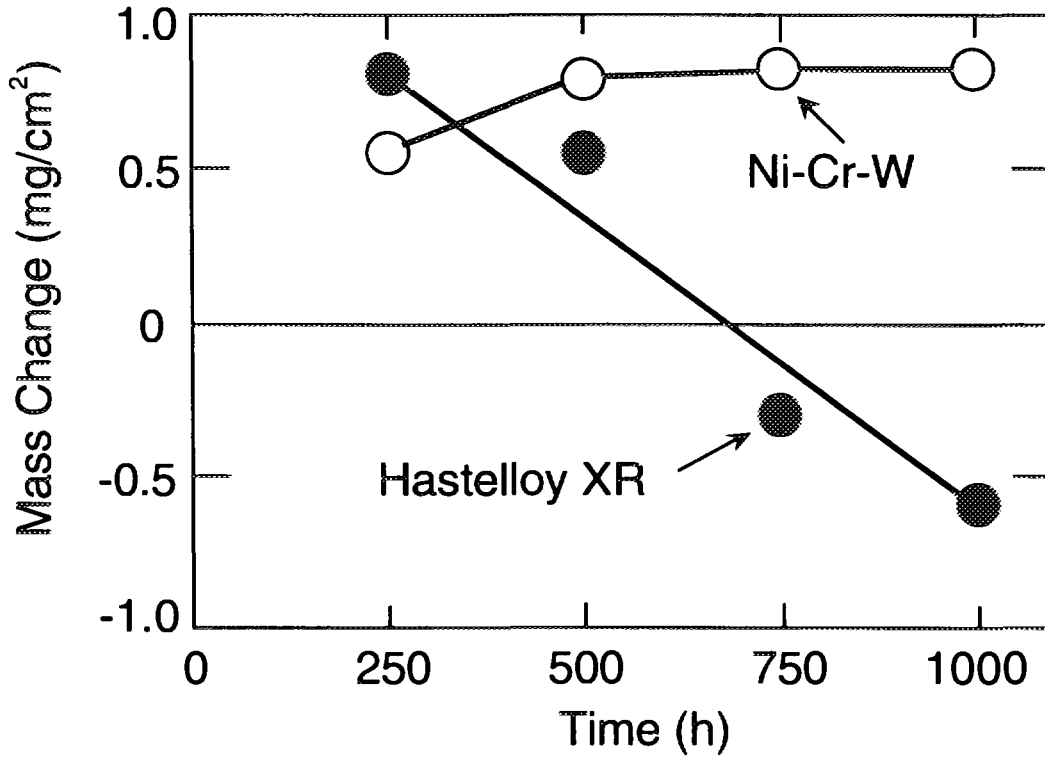


Fig. 2 Mass change of specimens oxidized at 950°C.

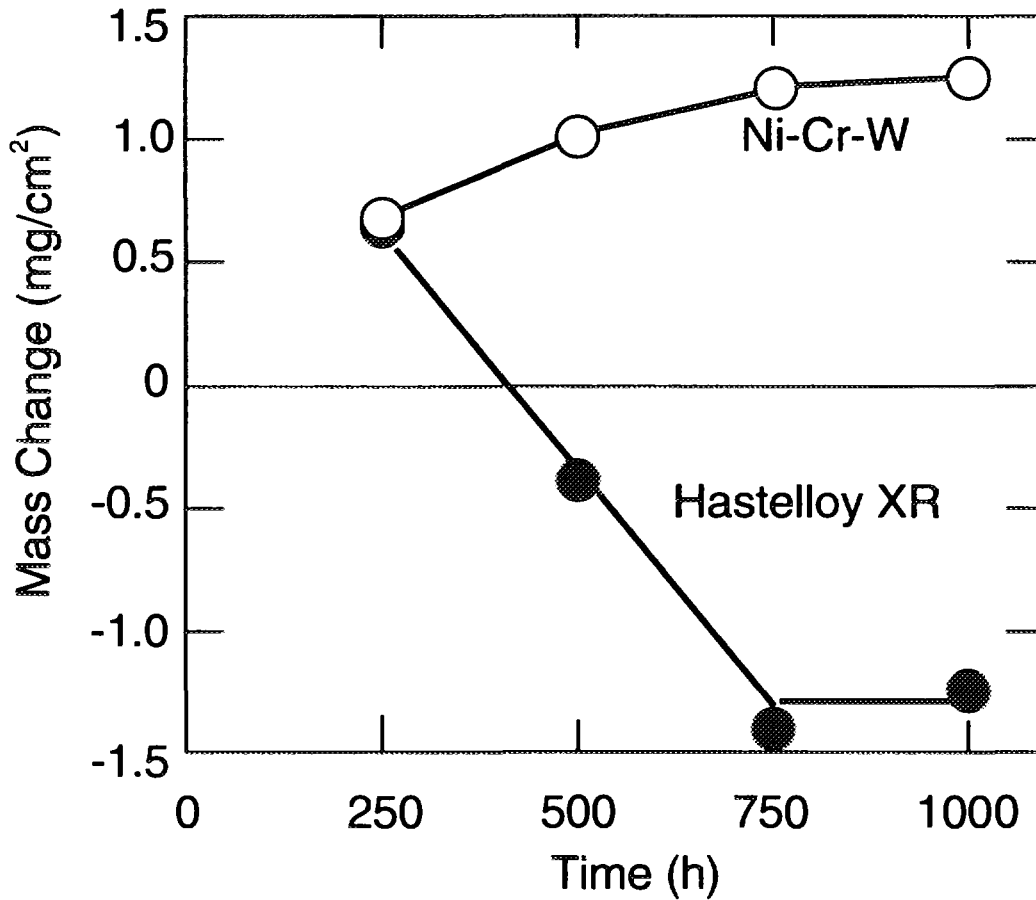


Fig. 3 Mass change of specimens oxidized at 1000°C.



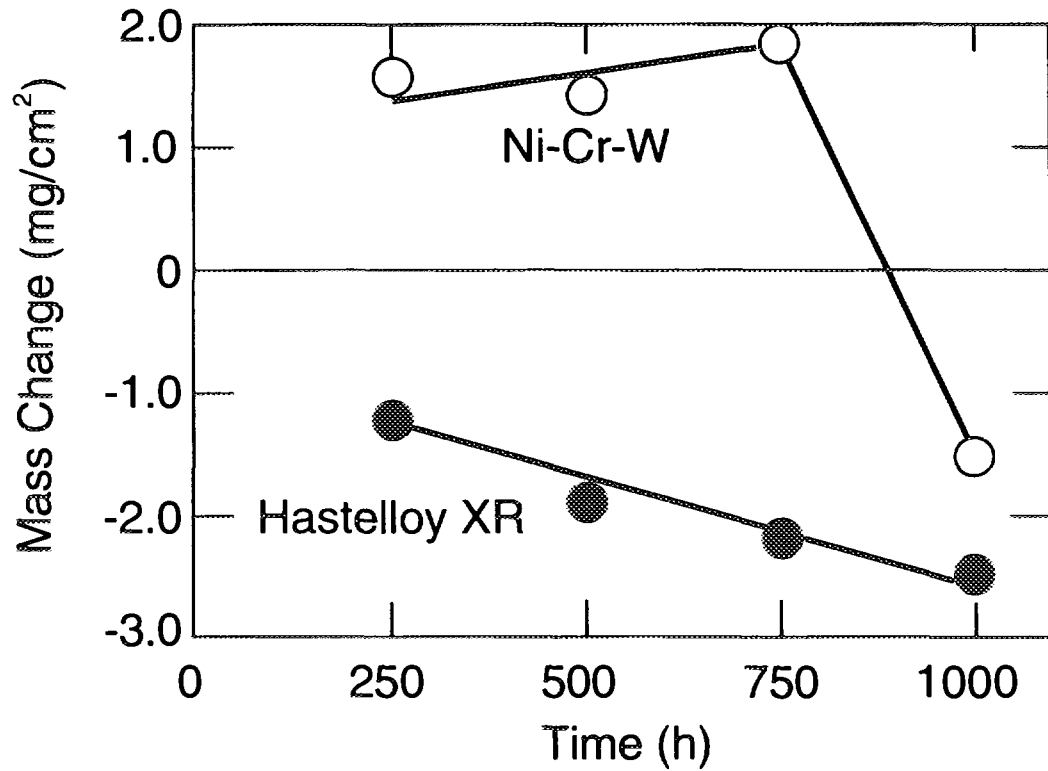


Fig. 4 Mass change of specimens oxidized at 1050°C.

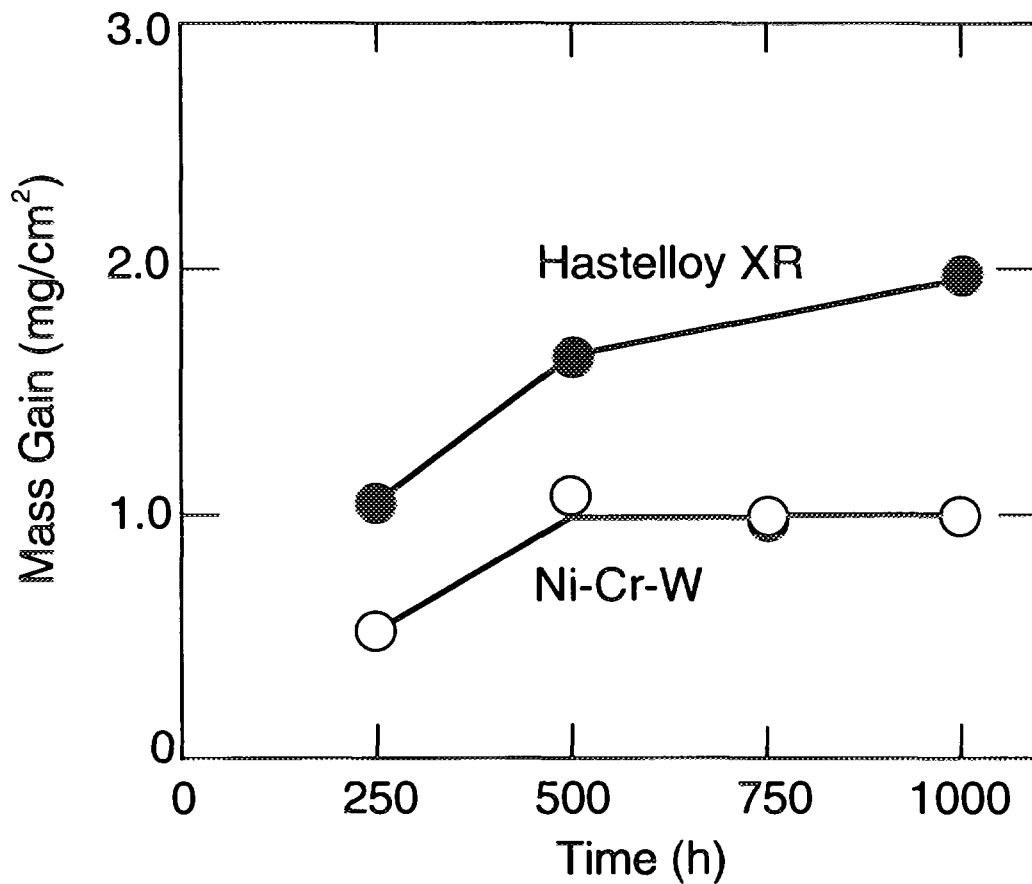


Fig. 5 Mass gain calculated from scale thickness of specimens oxidized at 950°C.

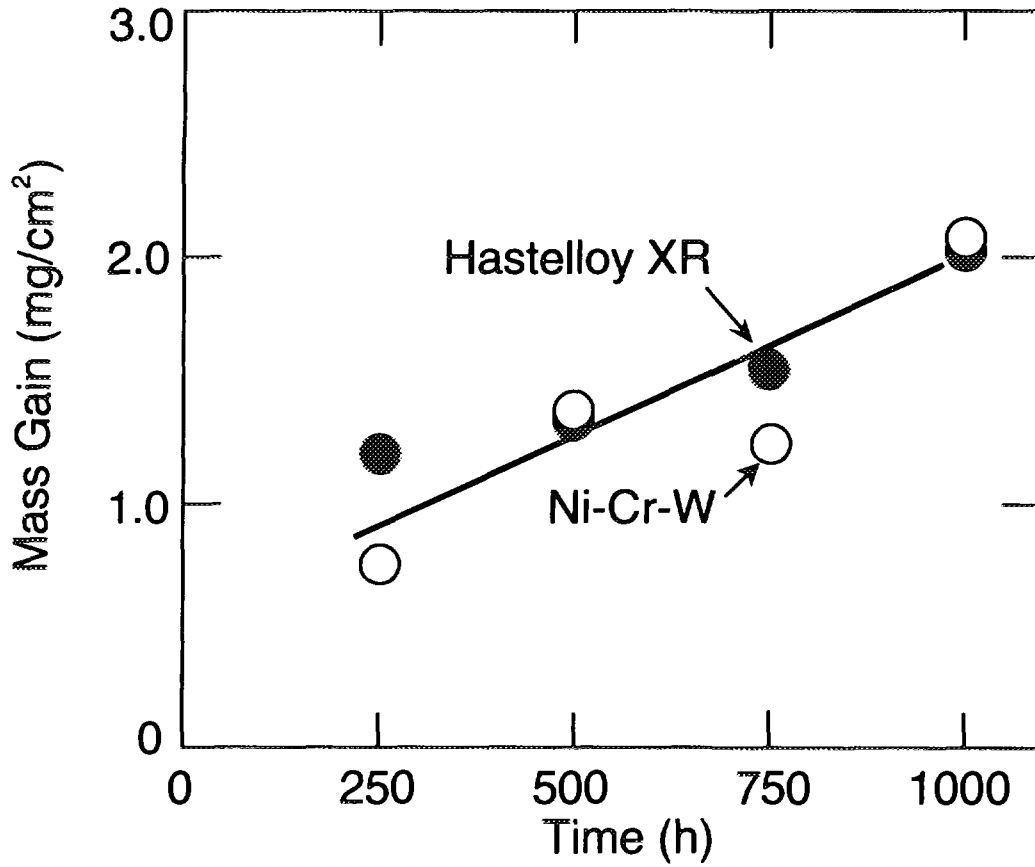


Fig. 6 Mass gain calculated from scale thickness of specimens oxidized at 1000°C.

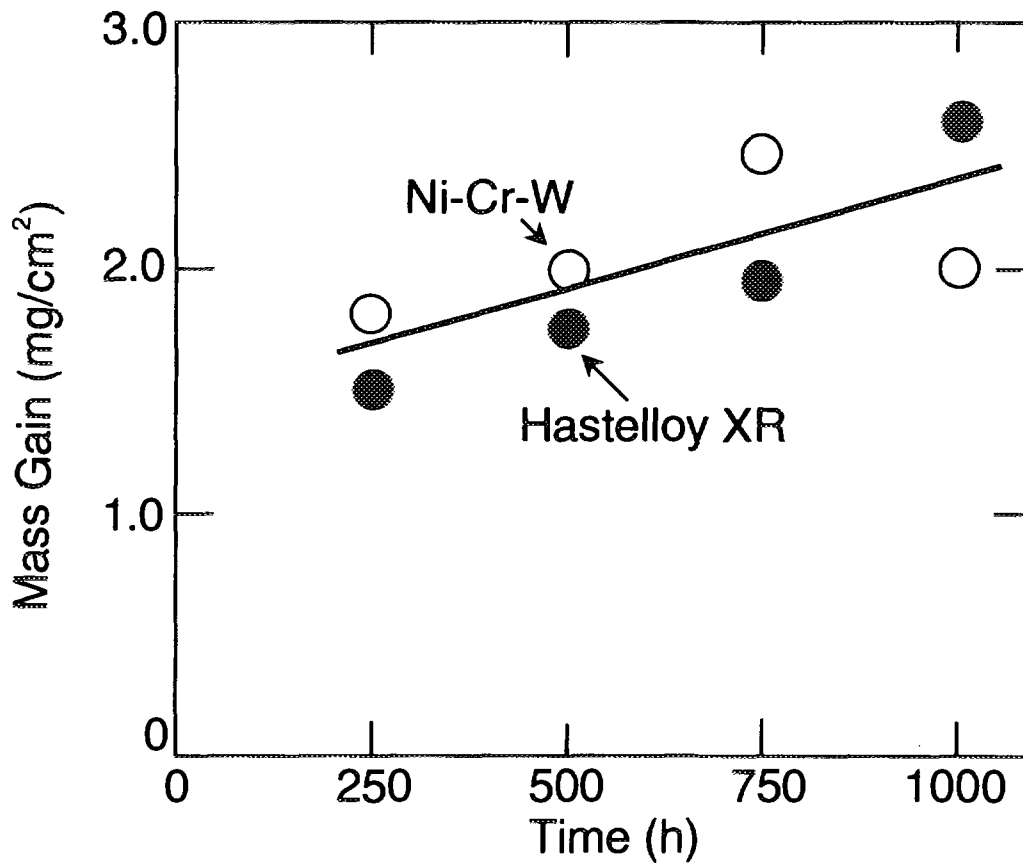


Fig. 7 Mass gain calculated from scale thickness of specimens oxidized at 1050°C.

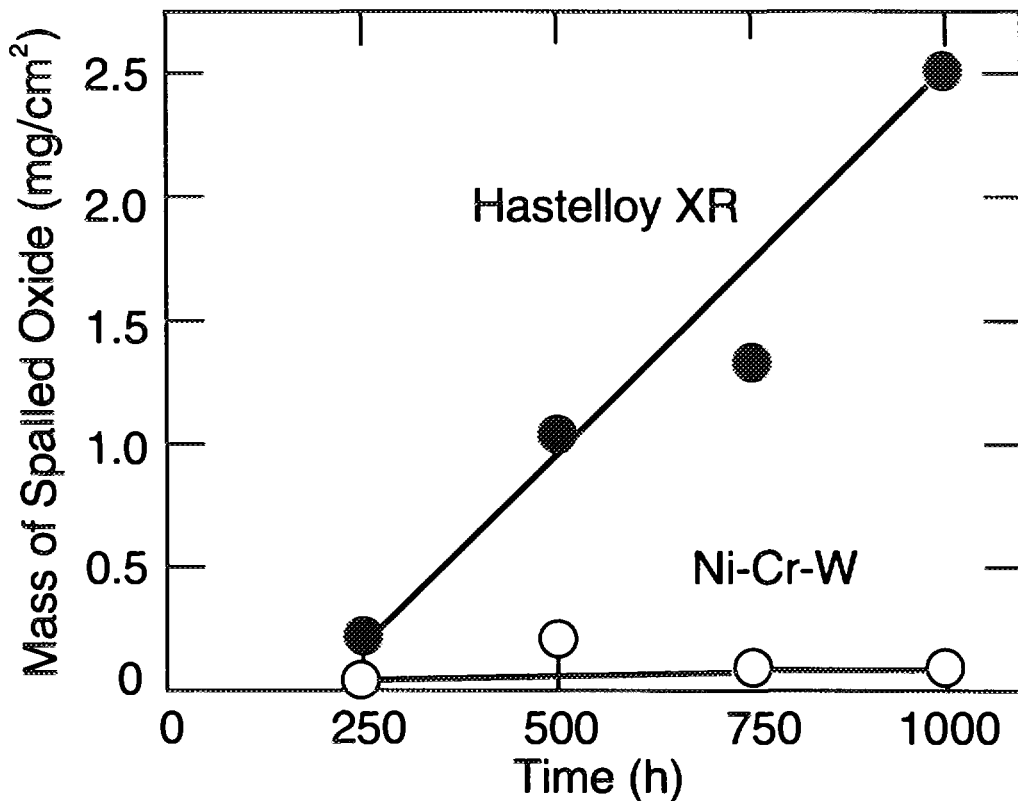


Fig. 8 Mass of oxide spalled from scales formed on alloys at 950°C.

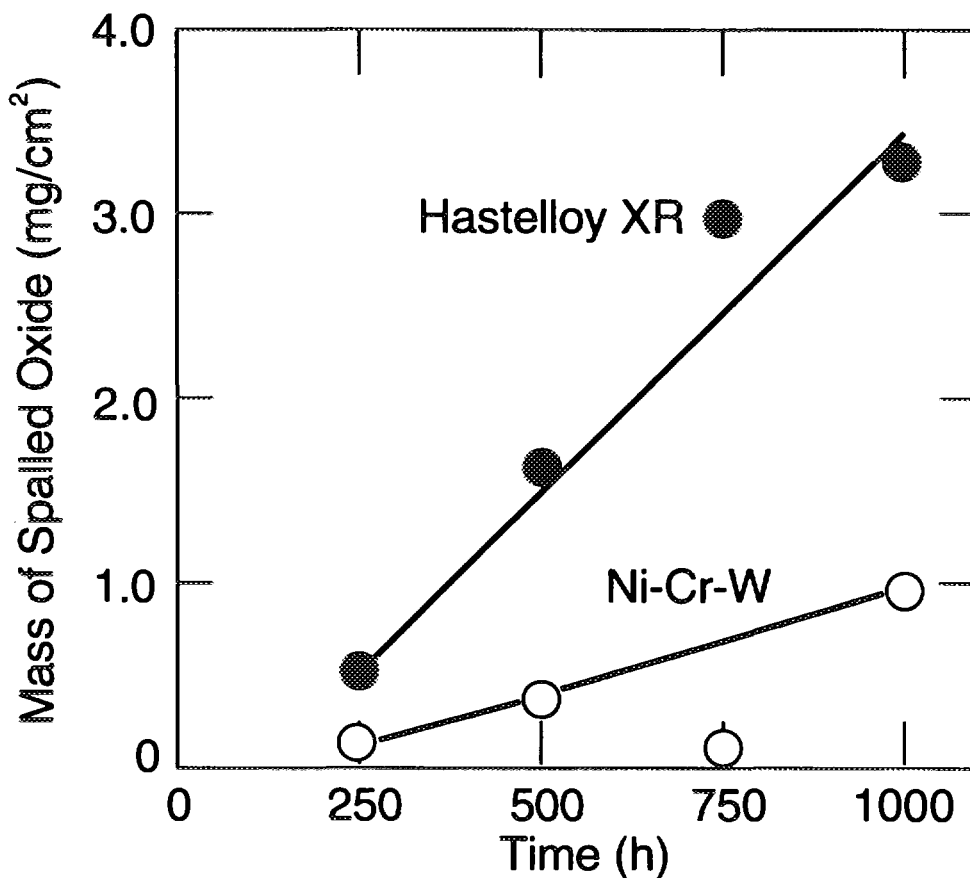


Fig. 9 Mass of oxide spalled from scales formed on alloys at 1000°C.

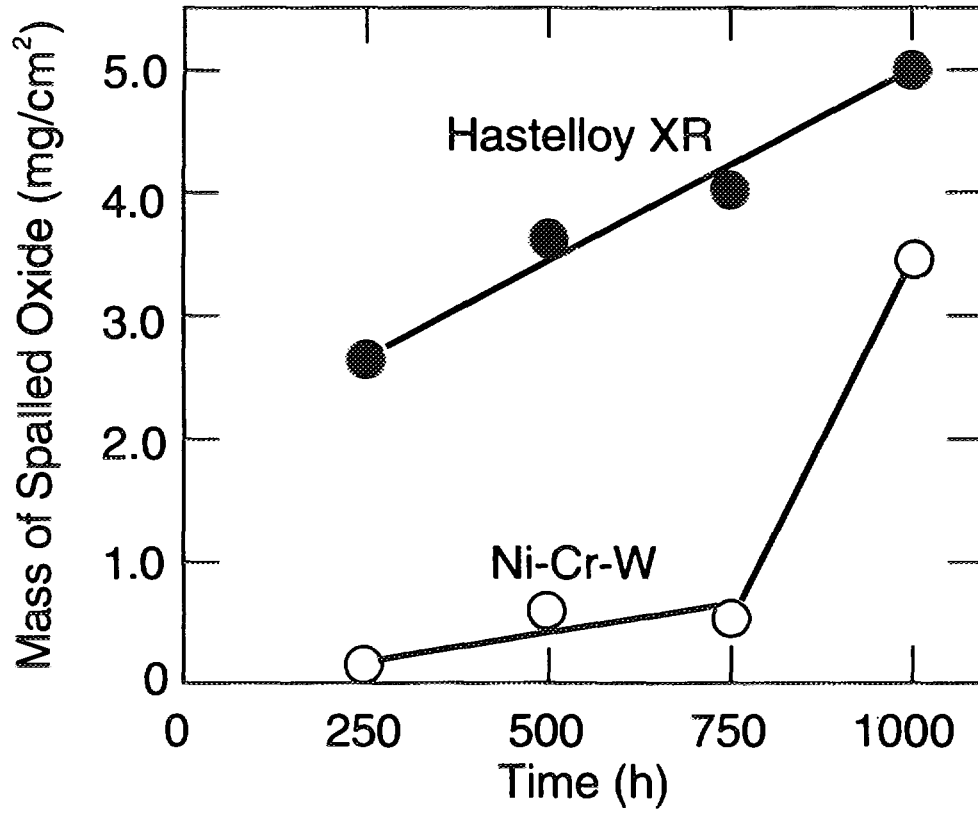


Fig. 10 Mass of oxide spalled from scales formed on alloys at 1050°C.

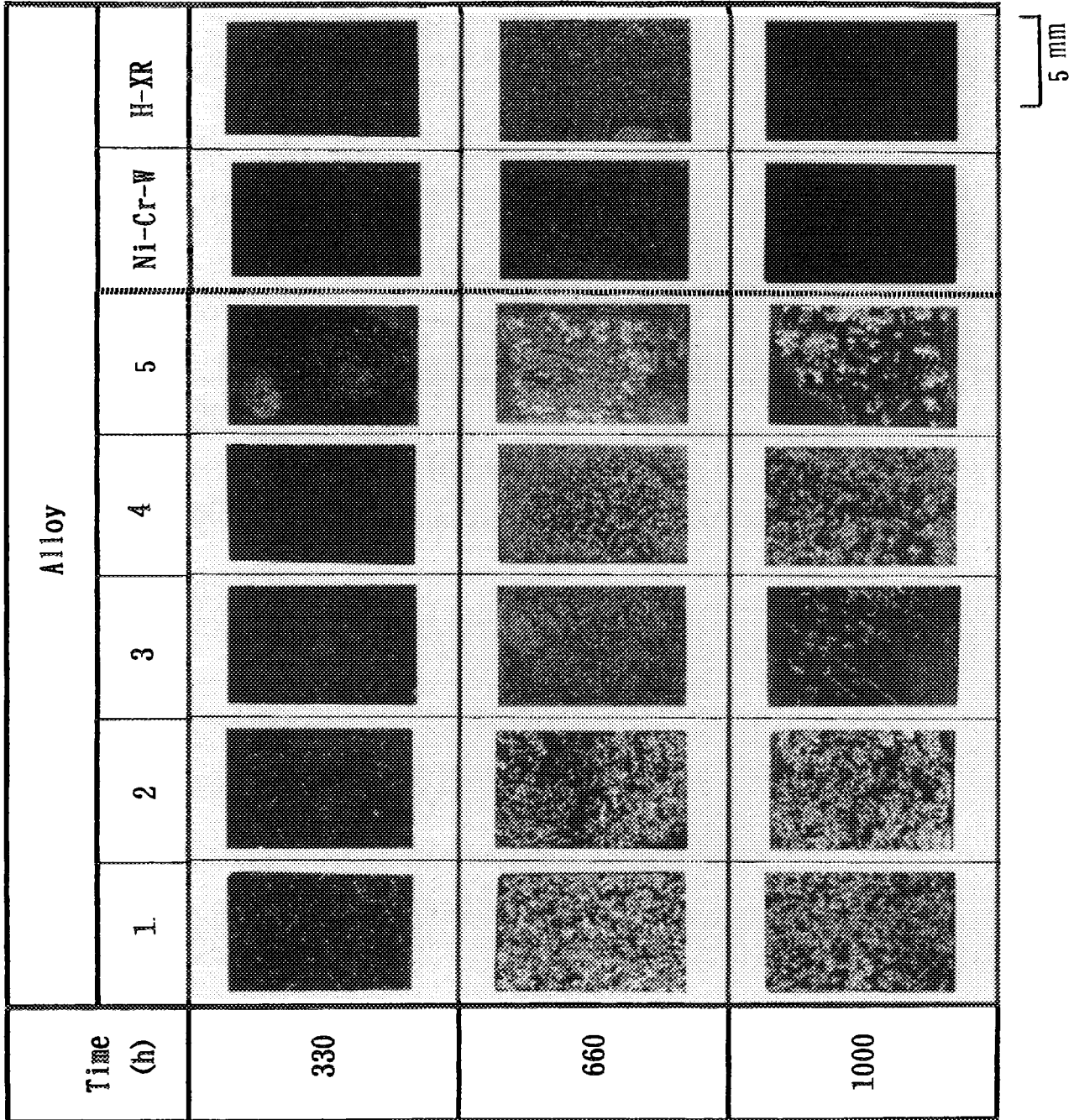


Fig. 11 Surfaces of specimens oxidized at 1000°C.

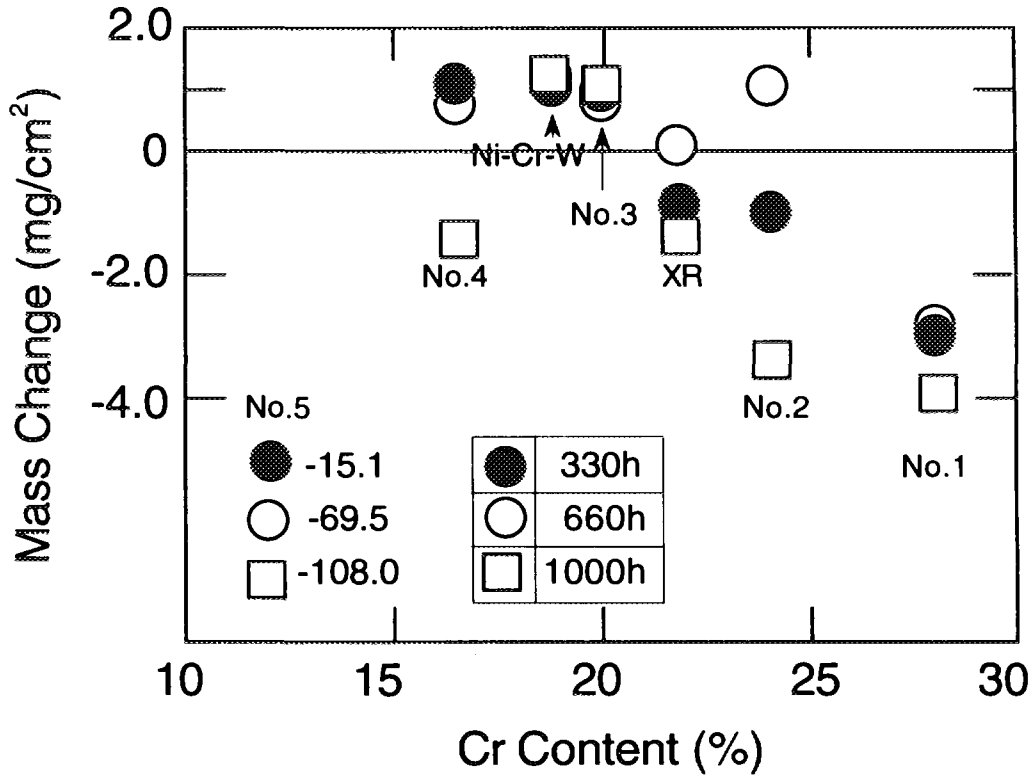


Fig. 12 Mass change of oxidized specimens as a function of Cr contents.

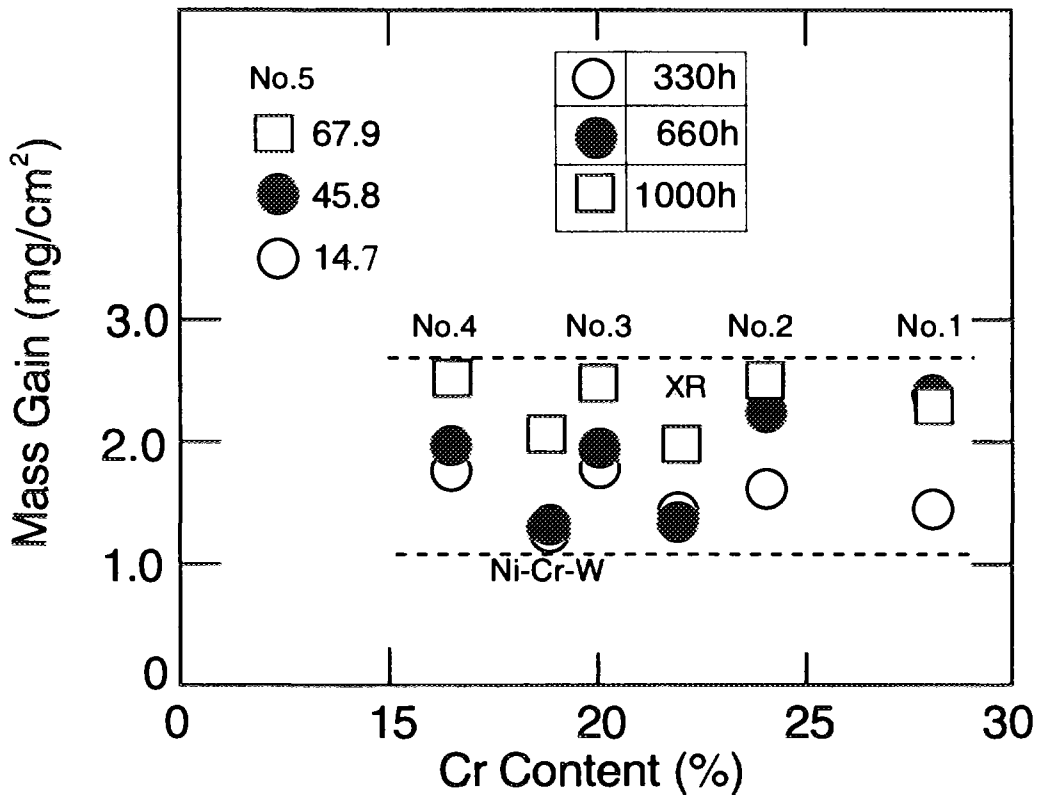


Fig. 13 Mass gain calculated from scale thickness of oxidized specimen as a function of Cr contents.

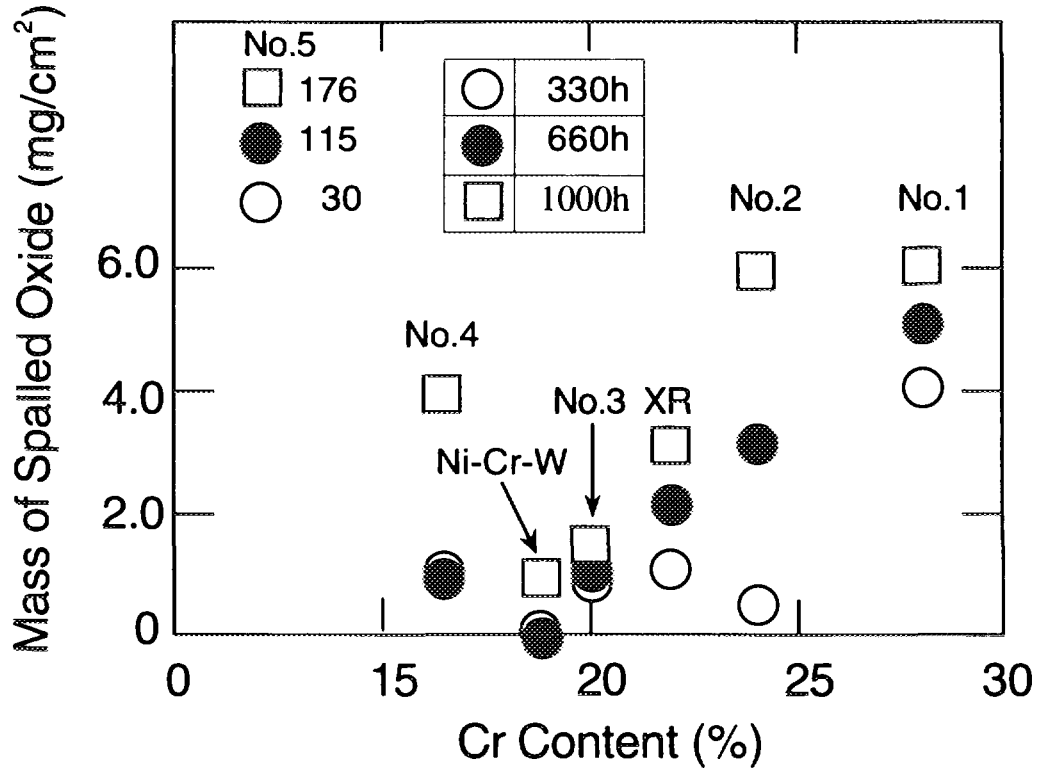


Fig. 14 Mass of oxide spalled from scales formed on alloys as a function of Cr contents.

# 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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>
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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

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
ハロン	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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、ヘクト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のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換算表

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

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>6</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (= 10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>2</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (= 10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-4</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>18</sup>	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 <sup>4</sup>	3.67098 × 10 <sup>3</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>3</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>18</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>11</sup>	75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-6</sup>	3.82743 × 10 <sup>20</sup>	1.51857 × 10 <sup>22</sup>	1.18171 × 10 <sup>19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1



N i · C r · W 系超耐熱合金の大気中高温酸化特性