

JAERI-Tech  
99-080



JP0050004



HTTR水素製造システムの水蒸気改質器触媒管健全性試験  
(I)全体計画、試験装置の製作  
(受託研究)

1999年11月

西原哲夫・高野 栄

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 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

HTTR 水素製造システムの水蒸気改質器触媒管健全性試験

(I) 全体計画、試験装置の製作

(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

西原 哲夫・高野 栄

(1999年10月15日受理)

HTTR 水素製造システムでは中間熱交換器を介して供給される高温の2次ヘリウムガスを熱源として、メタンの水蒸気改質により水素を製造する。このシステムの主要機器の一つが水蒸気改質器である。

水蒸気改質器では1次側(管外)を約880°Cの高温ヘリウムガスが、2次側(管内)を水素、水蒸気などの混合ガスであるプロセスガスが流れ、そのバウンダリーを形成しているのが触媒管である。HTTRでは2次ヘリウムガスのバウンダリーを形成する機器を原子炉設備第4種機器に分類していることから、改質器のみならず触媒管も原子力設備として設計することが求められる。このような高温条件下で使用できる高温ガス炉用材料は、HTTRの中間熱交換器伝熱管に使用しているハステロイXRのみである。従って、触媒管もハステロイXRを使用することを前提として設計を進めている。

ハステロイXRはヘリウム雰囲気中使用することを前提として材料データを整備し、材料強度基準が定められている。すなわち、プロセスガスに対してハステロイXRが適用可能か明らかになっていない。そこで、プロセスガスを模擬した雰囲気において腐食試験を行い、腐食特性を明らかにするとともに、予腐食材を用いた引張、疲労及びクリープ試験から強度低下量を推定することにより、既に整備されている材料データがそのまま適用可能か、また、どの程度の安全裕度を確保すれば良いかを評価するための試験(触媒管健全性試験と称す)を計画した。

本報告は、全体計画、腐食試験装置の概要、及び酸化雰囲気中での腐食試験結果についてまとめたものである。

---

本研究は、科学技術庁の受託研究「核熱利用システムの技術開発」の成果である。

大洗研究所 : 〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

Corrosion Test of Reformer Tube Material in the HTTR Hydrogen Production System  
( I ) Total Test Plan and Construction of Test Apparatus  
(Contract Research)

Tetsuo NISHIHARA and Sakae TAKANO

Department of Advanced Nuclear Heat Technology  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 15, 1999)

In the HTTR hydrogen production system, hydrogen is produced by means of steam reforming of methane using hot secondary helium supplied from an intermediate heat exchanger. The steam reformer is one of most important equipment in this system.

In the steam reformer, helium gas whose maximum temperature is at 880°C flows outside of tubes and process gas that is a mixture of hydrogen, steam, carbon mono-oxide, carbon di-oxide and residual methane flows inside. The reforming tube has to withstand against these conditions

Only Hastelloy XR, nickel based high temperature resistant alloy, can meet the design temperature of reforming tube in available materials for nuclear equipment. Database of Hastelloy XR is provided for use in helium gas so that it is required to ensure the integrity of Hastelloy XR and the applicability of existing mechanical test database such as tensile strength, fatigue life, creep life and so on in the process gas. Corrosion tests in the simulated process gas condition and the mechanical tests by using post corrosion specimens are planned.

This report describes the test plan, corrosion test apparatus and a result of corrosion test in steam atmosphere.

Keywords : HTTR, Hydrogen Production System, Reforming Tube, Hastelloy XR, Corrosion, Mechanical Test

---

Present study is entrusted from Science and Technology Agency of Japan.

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 試験計画立案 .....	2
2.1 プロセスガス中の腐食 .....	2
2.2 腐食試験 .....	4
2.3 金属組織観察 .....	5
2.4 強度試験 .....	5
2.5 スケジュール .....	6
3. 腐食試験装置の概要 .....	7
3.1 試験装置 .....	7
3.2 運転モード .....	9
4. 酸化試験結果 .....	1 1
5. まとめ .....	1 2
謝辞 .....	1 2
参考文献 .....	1 3

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Test Plan .....	2
2.1 Corrosion in the Process Gas .....	2
2.2 Corrosion Test .....	4
2.3 Metallography Observation .....	5
2.4 Mechanical Test .....	5
2.5 Schedule .....	6
3. Corrosion Test Apparatus .....	7
3.1 Outline of the Test Apparatus .....	7
3.2 Operation Mode .....	9
4. Oxidation Test Results .....	1 1
5. Conclusions .....	1 2
Acknowledgement .....	1 2
References .....	1 3

This is a blank page.

## 1. 緒言

高温ガス炉は原子炉出口温度約 950℃のヘリウムガスを供給できることから、原子力エネルギーを発電以外の分野で利用することが可能である。この高温核熱を化学プロセスの熱源として利用することにより、化石燃料の消費量が削減でき、地球温暖化問題の解決に大きく貢献できる。現在、原研では日本初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉（HTTR）を用いて、燃焼時に二酸化炭素を放出しないクリーンエネルギーである水素を製造するシステムの研究開発を進めている<sup>(1)(2)</sup>。

HTTR 水素製造システムは、技術的には成熟したシステムで、かつ、経済的に最も優れているメタンを主原料とする軽質炭化水素の水蒸気改質法を用いて水素を製造する。その概略系統構成を Fig.1.1 に示す。本システムの主要機器の一つとして水蒸気改質器がある。改質器は中間熱交換器を介して供給される原子炉 2 次冷却材（2 次ヘリウム）を熱源とするため、2 次ヘリウムのバウンダリーを構成する機器である。そのため、一般プラントのようなオープンループの加熱炉式改質器は使用できず、クローズループの圧力容器式改質器が必要となる。HTTR 水素製造システムの水蒸気改質器の概略図を Fig.1.2 に示す。

水蒸気改質反応は触媒反応である。そこで、伝熱管に触媒を充填し、熱源である 2 次ヘリウムは管外を流れ、管内を流れるプロセスガスを昇温して、メタンを改質し、水素を製造する。（以下、この伝熱管を触媒管という。）すなわち、この触媒管は 2 次ヘリウムの圧力バウンダリーとして高い信頼性が要求される。触媒管は最高 880℃の高温下で使用されるが、このような条件下で使用可能な高温ガス炉用材料は Hastelloy XR のみである。Hastelloy XR の組成を Table 1.1 に示す。Hastelloy XR はヘリウム中での使用を想定して材料強度基準<sup>(3)</sup>が定められており、プロセスガス（ $H_2$ 、 $H_2O$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ の混合ガス）に対する耐食性及び腐食による強度特性の変化については明らかになっていない。そこで、Hastelloy XR のプロセスガスに対する腐食特性を明らかにするとともに、腐食による強度変化を確認し、既存の材料強度基準が使用可能か判断するための試験を行うこととした。この試験を触媒管健全性試験と称す。

まず、プロセスガス雰囲気が発生しうる腐食モードの特定を行った。そして、比較的短期間で設計寿命中の腐食挙動を評価するため、個々のモードに対して腐食が加速される条件で試験を行うとともに、実機雰囲気を模擬した条件で総合的な評価を行い、強度特性に著しい変化を及ぼしうる腐食が発生しないことを確認する。次に、予腐食試験片を用いて各種材料強度試験（引張、疲労及びクリープ）を行い、採取されたデータが既存の材料データのばらつきの範囲内に収まることを確認する。万一、ばらつきの範囲内に収まらない場合は、強度基準に安全係数を乗じて、設計を行うこととする。

本報告書では、試験計画の立案、腐食試験装置の概要、及び酸化試験の金属組織観察結果について述べる。

## 2. 試験計画立案

触媒管健全性試験は、ハステロイ XR のプロセスガス中での腐食特性及び強度特性を評価し、既存の材料強度基準をそのまま使用できるか判断するために実施するものである。そこで、試験計画を立案するに当たって、プロセスガス中で発生しうる腐食モードを特定し、その挙動がどのようなプロセス量に影響を受けるかを検討した。この結果に基づいて、腐食試験条件を定めるとともに、金属組織観察において観察すべき項目を定めた。また、既存の材料データと比較するために行う強度試験の試験条件を定めた。その詳細を以下に示す。

### 2.1 プロセスガス中の腐食

プロセスガスは触媒管入口部では  $\text{CH}_4$  を主成分とする低質炭化水素と  $\text{H}_2\text{O}$  の混合ガスであるが、触媒管内部で改質反応が進むにつれて  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  が生成される。改質器の概念設計結果から<sup>(4)</sup>、Fig 2.1 に触媒管軸方向のプロセスガス組成分布を、Fig 2.2 に温度分布を示す。7 m が触媒管先端部に当たる。本雰囲気では、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  による酸化、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  による浸炭、及び  $\text{H}_2$  による脆化が想定される。そこで、それぞれの腐食について、本条件下でどの程度進行するか予備評価を行う。

#### (1) 酸化

ハステロイ XR では、酸化により金属表面に  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  酸化膜が生成され、表面近傍で Cr 欠乏層が発生する。そして、この欠乏層は強度低下を引き起こす原因の1つと考えられている<sup>(5)</sup>。そこで、酸化量や Cr 欠乏層に重点を置いた評価が必要となる。酸化量を推測する場合、雰囲気酸素分圧が一つの尺度となる。酸素は下記の反応により生成される。



この時の、各反応における酸素分圧 ( $P_{\text{O}_2}$ ) は下記の式から求められる。

$$P_{\text{O}_2(1)} = (K_P(1) \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} / P_{\text{H}_2})^2 \quad (3)$$

$$P_{\text{O}_2(2)} = (K_P(2) \cdot P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}})^2 \quad (4)$$

ここで、 $P$  : 分圧 (Pa)、 $K_P$  : 平衡定数である。

平衡定数  $K_P$  は温度の関数として下記の式から計算される<sup>(6)</sup>。その結果を Fig. 2.3 に示す。

$$\ln K_P = -\frac{\Delta H_{r0}^0}{RT} - \frac{\Delta \alpha - \Delta S_{r0}^0}{R} + \frac{\Delta \alpha \ln(T/T^0)}{R} + \frac{\Delta \beta T}{2R} + \frac{\Delta \gamma T^2}{6R} \quad (5)$$

$$\Delta H_{r0}^0 = \Delta H_{r,298}^0 - \Delta \alpha T_0 - \Delta \beta T_0^2/2 - \Delta \gamma T_0^3/3 \quad (6)$$

$$\Delta S_{r0}^0 = \Delta S_{r,298}^0 - \Delta \alpha \ln(T_0/T^0) - \Delta \beta T_0 - \Delta \gamma T_0^2/2 \quad (7)$$



ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ：定圧モル熱容量  $C_p = \alpha + \beta T + \gamma T^2$  で表した時の各係数、 $T$ ：温度 (K)、 $T^\circ$ ：1K、 $T_0$ ：298.15K、 $R$ ：ガス定数 (8.314 J/mol/K)、 $\Delta H_{r, 298}^\circ$ ：標準反応熱 (J/mol)、 $\Delta S_{r, 298}^\circ$ ：標準エントロピー (J/mol/K)

式(3)及び(4)を用いた計算した各部位における酸素分圧を Table 2.1 に示す。酸素分圧はいずれの反応においてもほぼ同じ値となっている。一方、HTTR で使用するヘリウムガス中には微量の不純物を含んでおり、2次ヘリウムガスの酸素分圧は  $2.0 \times 10^{-20}$  MPa 程度と推測される。したがって、HTTR ヘリウム雰囲気のほうが酸素分圧は若干低いものの、酸化挙動に関してはプロセスガス中とヘリウムガス中で大きな差異はないと考えられる。

一般に、金属の酸化速度は Wagner の放物線則に従う。そして、ハステロイ XR のヘリウム中の酸化速度もそれに従い、3,000 時間で  $4 \mu\text{m}$  程度の酸化膜を形成する<sup>(7)</sup>。そこで、プロセスガス中の酸化膜厚さを測定し、放物線則により設計寿命中に形成される酸化膜厚さを評価し、腐食代を求めることができる。

## (2) 浸炭

CO や  $\text{CH}_4$  が分解すると炭素が析出する。この炭素が金属表面に付着し、金属組織内へ拡散する現象を浸炭と言う。ハステロイ XR は炭素含有量が少ないことから、浸炭の影響を大きく受け、硬度が増すとともに延性が低下する。炭素析出を評価する尺度として炭素活量 (ac) がある。炭素活量は温度の関数として求められる平衡定数を各ガス成分の分圧から求められる平衡定数で除した値であり、1 より大きい場合に炭素が析出する雰囲気となる。プロセスガス成分から想定される炭素析出反応は下記の3つの反応である。



また、炭素活量は下記の式で表すことができる。

$$ac_{(8)} = K_{P(8)} \cdot P^2 \text{CO} / P \text{CO}_2 \quad (11)$$

$$ac_{(9)} = K_{P(9)} \cdot P \text{CO} \cdot P \text{H}_2 / P \text{H}_2\text{O} \quad (12)$$

$$ac_{(10)} = K_{P(10)} \cdot P \text{CH}_4 / P^2 \text{H}_2 \quad (13)$$

ここで、 $K_P$ ：平衡定数、 $P$ ：各ガス成分の分圧 (Pa) である。(5)式より計算した平衡定数  $K_P$  は Fig. 2.4 に示す通りである。

(11)式から(13)式を用いて計算した各部位における炭素活量を Table 2.1 に示す。触媒管入口部ではメタンと水蒸気の混合ガスであることから(13)式の ac は無限大になるが、反応が進むにつれて水素が生成され、ac は即時に1以下になるため、実際炭素が析出する可能性は非常に小さい。

また、触媒管の腐食には直接関係ないが、改質器出口部では7mのガス組成で温度が600℃まで低下するため、(11)式の炭素活量が約18と非常に大きくなっている。この状態で配管内をプロセスガスが流れると配管内で著しい腐食が発生する可能性がある。この現象はメタルダスティング<sup>(8)(9)</sup>と呼ばれている。メタルダスティングでは、局部的または全面的なピッチングあるいは全面腐食を引き起こし、腐食面には著しい浸炭層が観察される。

メタルダスティングの発生機構は以下のように考えられている。

- (a) 雰囲気中の炭素活量が大きくなると炭素が析出し、浸炭が発生する。
- (b) 浸炭により金属表面で多くの炭化物が生成される。
- (c) 炭素活量が低下すると、炭化物が炭素と金属粒子に分解する。
- (d) この現象を繰り返すことによりピッチングが発生する。

ハステロイ XR のように多量の Cr を含む合金では、雰囲気が酸化性であると表面に  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  の保護被膜が形成される。これにより浸炭が抑制され、メタルダスティングが発生しないことが報告されている<sup>(10)</sup>。しかし、触媒管出口部は 600℃ と比較的低温で酸化速度が遅いことから、運転初期段階において十分な酸化膜が形成されていない状態で、制御設備などの異常により炭素析出雰囲気になる場合でも触媒管の健全性が確保できることを示す必要はある。

### (3) 水素脆化

水素脆化は、時効効果により粒界に析出する炭化物に水素がトラップされることにより、粒界破壊を引き起こし、機械強度が低下する現象である。これまでの研究から、水素脆化は炭化物の形成に伴う Cr 欠乏層に大きく影響を受け、ハステロイ XR のように Cr 含有量が 20wt% を超える合金では水素脆化は発生しないと考えられていた。しかし、ニッケル基合金インコネル 600 を用いた試験より、粒界に連続的に炭化物が析出し、かつ粗大化した場合に水素脆化が起こる<sup>(11)</sup>。

ハステロイ XR は、大気中の時効試験から粒界には Mo を主成分とした炭化物が連続的に析出し、時間とともに粗大化することが分かっている<sup>(12)</sup>。すなわち、ハステロイ XR でも水素脆化が発生する可能性は十分ある。実際の触媒管には応力時効脆化の影響を大きく受け、それによる延性低下が著しいことから、水素脆化の効果がどの程度加重されるか明らかにする。

## 2.2 腐食試験

腐食試験は、酸化、浸炭（メタルダスティング）及び水素脆化の個々の腐食挙動を確認するための加速試験と実機雰囲気を模擬した試験の 2 種類の試験を行う。試験条件として定めなければならない物理量は、温度、圧力、ガス組成及び試験時間である。このうち試験圧力は試験装置の関係から最高 0.3MPa に制限されるが、酸素分圧及び炭素活量は各成分の分圧に大きく依存する。そこで、所定の酸素分圧及び炭素活量を再現するため、ガス成分比を任意に調節することとした。

酸化については水蒸気 100% 雰囲気中で加速試験を行う。酸化速度は温度に比例するため、温度条件は 2 次ヘリウムの最高温度 880℃ を包絡する 900℃ と、温度依存性を定量評価するため 800℃ の 2 温度条件で試験を行う。

浸炭については改質器出口部で炭素活量が大きくなることから、この雰囲気を模擬し、温度 600℃、炭素活量約 20 に設定した条件で試験を行い、ハステロイ XR がメタルダスティングに対して健全性を維持できるか評価する。

水素脆化の水素圧力依存性は確認されていないが、水素透過量が多いほど炭化物にトラップされる水素量は多くなり、その結果、粒界破壊が発生する確率も高くなると考えられる。実機における触媒管内部の水素分圧は最高 1.8MPa 程度である。しかし、運転中に触媒管表面には酸化膜が形成され、その効果により水素透過量は低下する。酸化膜の効果により水素透過量は最大 1/100

程度まで低減される<sup>(13)</sup><sup>(14)</sup>。水素透過量は水素分圧の平方根に比例することから<sup>(15)</sup>、酸化膜の効果は水素分圧が $1/10^4$ になる効果と等価である。すなわち、この時の水素透過量は水素分圧が $1.8 \times 10^{-4}$ MPaの場合と同じである。従って、水素圧力を0.2MPaとした場合、比保守的な条件とはならない。試験温度は水素感受性が高くなる700℃及び水素透過量が多くなる900℃の2条件とした。

個々の腐食特性を確認した後、実機と同等の酸素分圧、炭素活量を模擬した雰囲気のプロセスガスに対する腐食特性を確認する。

腐食条件をTable 2.2に示す。なお、試験時間は6条件の試験を効率よく行うために、最高3000時間に設定した。実機的设计寿命を10年とすれば、試験時間はその1/20程度と非常に短い、個々の加速試験結果を基に、長時間の腐食量を推定する。

### 2.3 金属組織観察

薄肉試験片を用いて腐食後の金属組織を観察し、腐食量を測定するとともに、大気中及びヘリウム中の特性との相違を評価する。観察項目は以下の通りである。

#### (1) ミクロ組織観察

試験片を切断、表面研磨した後、酸化膜厚さ、表面亀裂及び内部酸化の有無を観察する。さらに、エッチング処理を行い、粒界及び粒内に析出した炭化物の状態を観察する。

#### (2) SEM・EDX分析

析出した炭化物の組成を測定し、既存データとの相違点を明らかにする。

#### (3) EPMA分析

酸化による表面近傍のCr欠乏層厚さを測定し、ヘリウム中の結果と比較検討を行う。また、表面近傍における内部酸化の有無を特定する。

### 2.4 強度試験

強度試験では、腐食したハステロイXRの材料強度(引張強さ、疲労寿命及びクリープ寿命等)が、大気中及びヘリウム雰囲気で取得された既存データのばらつきの範囲内に収まることを確認する。

引張試験において、ハステロイXRは800℃以上で粘性効果が大きく顕著な加工硬化を示さないことから、JISに規定された試験方法に従って0.3%/minのひずみ速度で引張試験を行うと、最大引張強さは本来ハステロイXRが有している値より小さくなる。そこで、強度基準を整備する際、800℃以上の引張試験はひずみ速度100%/minで実施した<sup>(3)</sup>。従って、触媒管健全性試験における引張試験もこれと同様に100%/minのひずみ速度で試験を行う。得られた降伏応力及び最大引張強さ、破断伸び、絞りを既存データと比較検討する。

疲労試験は雰囲気の影響を敏感に受けるので、新たな腐食(酸化)の影響を排除するため、真空中で行う。負荷波形は完全両振り三角波形とし、ひずみ速度は0.1%/sec一定で全ひずみ範囲をパラメータとして試験を行う。全ひずみ範囲は、破断サイクル数が1,000から10,000になるように設定する。この場合、既存データから概ね0.2%から0.5%程度となる。得られた結果から、疲労寿命特性、繰返し硬化特性などを既存データと比較検討する。

クリープ試験も新たな腐食（酸化）の影響を排除するために不活性ガス（HTTR 用近似ヘリウム）中で試験を行う。通常運転中、触媒管に負荷される 1 次応力は非常に小さく、約 3MPa 程度である。この値を再現するためには試験片に負荷する荷重は 8.5kg 程度で試験装置の適用範囲外になってしまう。また、このような低応力での大気中のクリープ寿命は 100,000 時間のオーダーであり、試験期間を考慮すると実施困難である。そこで、比較的高応力下（4～5MPa、破断寿命 100～500 時間程度）で試験を行い、クリープ変形特性（定常クリープ速度、3 次クリープ開始寿命、を比較することにより、既存データが適用可能か評価する。

腐食試験装置に装荷する試験片の形状を Fig. 2.5 に示す。なお、強度試験は、東海研究所エネルギーシステム研究部所有の各種試験装置を用いて試験を実施する。

## 2.5 スケジュール

触媒管健全性試験は平成 9 年度から開始し、5 年間実施する予定である。平成 9 年度は腐食試験装置を製作し最初の実験である 900℃の水蒸気雰囲気での腐食試験を開始した。平成 10 年度中旬に本試験機を東海研究所から大洗研究所に移設するのに伴い、長期間試験が中断された。移設後、可燃性ガス供給配管及び排気ダクトの工事を行い、平成 11 年度から第 2 回目の腐食試験として 700℃、水素雰囲気での試験を開始した。タイムスケジュールを Table 2.3 に示す。

### 3. 腐食試験装置の概要

#### 3. 1 試験装置

腐食試験装置の概略構成を Fig.3.1 に示す。試験装置は、試験ガスのうちガス成分を調整するガス混合系、蒸気流量を調整する蒸気供給系、試験片を腐食させる試験部本体、試験ガスを気水分離、排気するガス処理系及びその他附属設備からなる。以下に、本試験装置を構成する主要機器の仕様を示す。

#### (1) 試験部本体

##### a) 電気加熱炉

形 式：半分割円筒型電気加熱炉  
 数 量：1 基  
 寸 法：全長 1060 mm、  
           加熱部内径 120 mm、有効発熱長 1000 mm  
 主要材質：発熱体                    カンタル  
           ヒータ支持ブロック       MRT1220  
           断熱材                    IGP バルク  
           ケーシング                SUS304  
 設計温度：200～1000℃（流路管表面温度）  
 ヒータ容量：15kW（1.5kW×2 本並列結線×5 回路）  
 ヒータ電源：単相 200V

##### b) 流路管

型 式：フランジ付き円管  
 数 量：1 基  
 寸 法：全長 1580 mm、外径 101.6 mm（円管部）  
           （石英管長さ 1000 mm）  
 材 質：インコロイ 800H  
 耐 圧：0.3MPa  
 設計温度：1100℃

#### (2) ガス混合系

##### a) ガス混合器

型 式：ガスブレンダー GB-4C 型（小島製作所製）  
 数 量：1 台  
 使用圧力：1MPa  
 入口体積流量計  
 型 式：W-NHoA-1B 型湿式ガスメータ（品川精器製）  
 数 量：1 台

測定流量：0.001～0.5m<sup>3</sup>/h

(3) 蒸気供給系

a) 純水タンク

形 式：架台付きポリエチレン角型タンク

数 量：1 基

容 量：0.02 m<sup>3</sup>

定流量ポンプ

型 式：NP-FX-3A（日本精密科学製）

数 量：1 台

設定流量：4.2～180.0 ×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/h

b) 蒸発器

形 式：縦型円筒容器

数 量：1 基

寸 法：外径 34 mm、高さ 300 mm（蒸発部）

材 質：SUS304

設計温度：400℃

設計流量：供試ガス 0.12Nm<sup>3</sup>/h、水蒸気 0.12Nm<sup>3</sup>/h

ヒータ容量：600W

ヒータ電源：単相 200V

(4) ガス処理系

a) ガス冷却器

形 式：縦置円筒型

数 量：1 基

寸 法：胴 部 外径 320 mm、高さ 420 mm  
冷却コイル 管外径 1/4”、ピッチ 15 mm

材 質：SUS304

b) 出口体積流量計

型 式：W-NHDa-1B 型湿式ガスメータ（品川精器製）

数 量：1 台

測定流量：0.001～0.5m<sup>3</sup>/h

c) ガスクロマトグラフ

型 式：GC-14BPT（島津製作所製）

数 量：1 台

キャリアガス：He、N<sub>2</sub>

検出ガス：H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>

d) 圧力制御弁

型 式：SR100（フジキン製）

数 量：1台

開閉時間：約0.1～0.3秒（片道）

許容Cv値：0.0000015～5

作動型式：ノーマルオープン

(5) その他の附属設備

a) マスフローコントローラー

型 式：F201（オーバル精機製）

数 量：1台

流 量：0～0.3Nm<sup>3</sup>/h（Arガス）

本体材質：SUS

b) ユニットクーラー

型 式：RKL-2200V-C（オリオン機械製）

数 量：1台

冷却能力：7.9kW（液温20℃、室温32℃）

c) ガス検知警報設備

検出端部型式：GD-D8（可燃性ガス）  
GD-K8D（毒性ガス） } （理研計器製）

指示計部型式：GP-571A（可燃性ガス）  
EC-572A（毒性ガス） } （理研計器製）

検知方式：接触燃焼式（可燃性ガス）  
定電位電解式（毒性ガス）

警報設定値：4.0vol%（可燃性ガス）  
25ppm（毒性ガス）

3. 2 運転モード

(1) 通常時

本装置では、ガス成分と水蒸気を別々に制御して供試ガスを作る。ガス成分はガス混合器で所定の成分比に調整し、入口体積流量計にて流量を測定後、蒸発器に供給する。水蒸気は定流量ポンプで所定の流量に調節、送出した純水を蒸発器内で加熱蒸発させ、水蒸気を生成する。これらを蒸発器内で混合し、供試ガスとして試験部本体に供給する。

試験部本体の構造を Fig.3.2 に示す。試験部本体では電気加熱炉ヒータにより、設定した雰囲気温度（最高 900℃）まで供試ガスを昇温する。なお、流路管は、内部に石英管を挿入し、流路管との隙間に Ar ガスを流すことで供試ガスが直接流路管に接しない構造とし、流路管の腐食を防止する。試験片は石英管内の治具に固定し、加熱雰囲気（供試ガス）に曝される。

供試ガスは、試験部本体下部においてある程度冷却した後、ガス冷却器で 50℃以下に冷却して気水分離する。ガス冷却器を出たガス成分は、出口体積流量計にて流量測定した後、排気筒から屋外に希釈放出される。また、出口体積流量計出口で一部のガスをバイパスして、ガスクロマトグラフにより成分分析を行う。

試験中の温度、圧力、流量などのプロセス量は、ハイブリッドレコーダにて記録するとともに、データロガーを介してパソコンでもデータ収集を行う。

## (2)異常時

本試験装置では長期間連続運転を行うため、夜間、休日中の事故を未然に防ぐため、各種インターロックを設け、異常時には早期に安全に試験装置を停止することとしている。そのインターロック設定可能な各種プロセス量の一覧を Table3.1 に示す。

通常運転中、各種プロセス量がインターロック設定値を超え、アラーム信号が発せられると、腐食試験装置は自動的に緊急停止する。緊急停止では、各ヒータ（試験部本体、蒸発器等）への通電を停止し、供試ガスの供給を停止すると共に、装置内部を Ar ガスでパージする。これにより、漏えいの拡大防止、火災、爆発等の抑止を図る。



#### 4. 酸化試験結果

現在までに、Table2.2 のケース 1、水蒸気環境下 900℃における酸化試験が終了し、金属組織観察を実施した。そこで、観察結果について報告する。

##### (1) ミクロ組織観察

Fig.4.1 に、3000 時間腐食後の試験片の断面写真を示す。試験片表面に腐食試験により生成された酸化膜（灰色の薄い層状の部分）が確認できる。この写真から、表面亀裂や金属内部の割れ、欠け等は観察されていない。

Fig.4.2 に酸化膜厚さの経時変化を示す。本結果より、酸化膜の増加特性は Wagner の放物線則に従い、酸化膜の厚さ  $x$  ( $\mu\text{m}$ ) と腐食時間  $t$  (h) の関係は  $x = 0.14 \times \sqrt{t}$  で近似され、He 中における酸化膜生成速度と比べ、約 2 倍程度加速されることが分かった。上記近似式から触媒管の 10 年後の酸化膜厚さは約  $30 \mu\text{m}$  と推測されるが、この程度の酸化膜による母材の減肉量はごくわずかであり、強度設計上、腐食代を考慮する必要はないと考える。

Fig. 4.3 に試験片表層近傍及び板厚中央部の組織の断面写真を示す。この写真より、試験片全面にわたって、粒界及び粒内に炭化物の析出が確認できる。

##### (2) SEM-EDX 分析

Fig.4.4 に試験片表層近傍及び板厚中央部の SEM 観察結果を示す。写真中の矢印を付けた析出物について EDX 分析した結果を Table4.1 に示す。分析結果から、表層近傍では析出した炭化物の多くが Mo を主成分とする  $\text{M}_6\text{C}$  炭化物であったのに対し、試験片板厚中央部では Mo を主成分とした  $\text{M}_6\text{C}$  炭化物と、Cr を主成分とした  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  炭化物が混在している<sup>(16)</sup>。

##### (3) EPMA 分析

EPMA 分析結果から、試験片表面近辺の主要成分濃度の変化を纏めたものを Fig. 4.5 に示す。形成された酸化膜の主成分は Cr であることが確認されたが、試験片表面近辺での Cr 濃度の低下は観察されなかった。従って、顕著な Cr 欠乏は起きていないものと考えられる。

##### (4) 評価

試験片表面に形成された Cr 酸化膜は保護性があることから、著しい表面酸化が抑制され、酸素分圧が高い状況でも酸化速度の加速は 2 倍弱であった。また、粒界及び粒内に析出した炭化物に関しては、He 中における場合と同じ傾向を示している。

以上の結果から、水蒸気中における Hastelloy XR の腐食は、材料特性に有意な影響は及ぼさないと考えられる。

## 5. まとめ

水蒸気改質器は HTTR 水素製造システムの主要機器の1つであり、その主要部材の触媒管は2次ヘリウムとプロセスガスの圧力バウンダリーを形成している。触媒管材料にはNi基耐熱合金の Hastelloy XR を使用するが、プロセスガスに対する健全性は確認されていない。そこで、Hastelloy XR のプロセスガス中の腐食特性及び腐食による強度変化を明らかにし、既存の材料強度基準が適用できるか否かを確認する目的で、触媒管健全性試験を計画した。

腐食試験では、酸化、浸炭及び水素脆化に関して個々の腐食特性を確認し、材料特性に大きな影響を及ぼす腐食が発生しないことを確認することとした。その後、プロセスガスを模擬した雰囲気中で腐食試験を行い、実際の使用条件下での腐食量を特定して、著しい腐食が発生しないことを確認する。腐食試験条件として6条件を設定した。

材料強度基準を策定する際に行われた強度試験は、引張、疲労及びクリープ試験である。そこで、予腐食試験片を用いて同一の強度試験を行う。

引張及び疲労試験においては、負荷条件は既存の強度基準を整備したときと同一条件とし、温度、ひずみ範囲等のパラメータを変化させ、強度特性の変化を調べる。一方、クリープ試験においては、高応力、短寿命の条件で試験を行い、クリープ変形特性の相違を調べる。これらの試験から得られたデータが既存データのばらつきの範囲内に収まることを確認することにより、Hastelloy XR が実機材料として使用に適しているか否かを判断する。

腐食試験に際しては、新たに大型の腐食試験装置を作成した。本試験装置ではガス成分と水蒸気を別々に調整し、任意のガス組成に制御して試験部本体に供給する。試験温度は最高1000℃まで設定可能である。試験部本体には5本の強度試験片を装着できる試験片治具を2個装着し、効率よく腐食試験を行えるようにした。

第1回目の腐食試験として温度900℃の水蒸気雰囲気における酸化試験を行った。そして、金属組織観察を行い、Hastelloy XR は耐酸化性に優れていることを確認した。形成された被膜はCrを主成分とした酸化膜で、酸化による割れ、欠け等は発生しなかった。酸化速度はヘリウム中の場合と比較して約2倍弱加速されるが、設計寿命末期において予測される酸化膜厚さは30μm程度で、設計上問題になる値ではない。酸化試験中に金属組織内部に析出した炭化物は、ヘリウム中における析出特性と相似であった。これらの結果から、Hastelloy XR の水蒸気による酸化が強度特性に顕著な影響を及ぼすことはないと考えられる。

## 謝辞

本報告書を纏めるに当たり有益なご指導を頂いた、核熱利用研究部 宮本喜晟部長、同 塩沢周策次長、同高温機器開発試験室長 小川益郎氏に感謝の意を表します。

腐食試験装置の製作に関しては助川電気工業(株)の協力を、金属組織観察に関しては鋼管計測(株)の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) T. Nishihara, et al., IAEA TECDOC-923, p179 (1997)
- (2) K. Hada, et al., IAEA TECDOC-761 p124 (1994)
- (3) 羽田一彦,他,JAERI-M 90-148”高温工学試験研究炉高温構造設計方針材料強度基準等の作成方法の検討”(1990)
- (4) 私信、HTTR 水素製造システムの概念設計(平成9年度報告書)
- (5) 新藤雅美,他, 日本学術振興会耐熱材料第123委員会研究報告, 17, 383 (1976)
- (6) 化学工学協会編,”化学工学便覧”,丸善, 71 (1988)
- (7) 近藤達男,他, JAERI-M 86-003”ハステロイ XR の製品品質最適化の研究”(1986)
- (8) P. A. Lefrancois and W. B. Hoyt, Corrosion, 19, 360 (1963)
- (9) R. F. Hochman, “Proc. of the 4th Int. Congress on Metal Corrosion”, NACE, 258 (1972)
- (10) J. C. Nava Paz and H. J. Grabkem, Oxidation of Metals, 39, 437 (1993)
- (11) 小寺澤啓司,他,材料, 46, 526 (1997)
- (12) 渡辺勝利,他, 日本学術振興会耐熱材料第123委員会研究報告, 23, 275 (1982)
- (13) W. Steinwarz, et al., Nucl. Tech. 46 312 (1979)
- (14) J. T. Bell, et al., Metallurgical Trans. A, 11A, 775 (1980)
- (15) 増井寛二, 他, 鉄と鋼, 64, 615 (1978)
- (16) 小川豊, 他, 鉄と鋼, 83, 329 (1997)

Table 1.1 Chemical composition of Hastelloy XR

	Chemical composition (wt%)						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Co
min	0.05	0.75	0.25	-	-	20.50	-
max	0.15	1.00	0.50	0.040	0.030	23.00	2.50

	Chemical composition (wt%)							
	Mo	W	Fe	Ni	B	Al	Ti	Cu
min	8.00	0.20	17.00	bal	0.0010	-	-	-
max	10.00	1.00	20.00		-	0.05	0.03	0.50

Table 2.1 Oxygen partial pressure and carbon activity

Tube length (m)	PO <sub>2</sub> (1) (MPa)	PO <sub>2</sub> (2) (MPa)	ac(11) (-)	ac(12) (-)	ac(13) (-)
0	∞	0	-	-	∞
1	3.93E-25	5.36 E-25	0.044	0.051	0.452
2	2.95E-23	4.42E-23	0.088	0.108	0.319
3	4.92E-22	5.43E-22	0.159	0.167	0.286
4	4.63E-21	5.69E-21	0.146	0.162	0.276
5	2.45E-20	3.14E-20	0.143	0.162	0.261
6	9.63E-20	1.22E-19	0.137	0.154	0.247
7	2.72E-19	3.46E-19	0.133	0.149	0.221

PO<sub>2</sub>(1) : Partial pressure for the reaction " $\text{H}_2\text{O}=\text{H}_2+1/2 \text{O}_2$ "

PO<sub>2</sub>(2) : Partial pressure for the reaction " $\text{H}_2\text{O}=\text{H}_2+1/2 \text{O}_2$ "

ac(11) : Carbon activity for the reaction " $2 \text{CO}=\text{C}+\text{CO}_2$ "

ac(12) : Carbon activity for the reaction " $\text{CO}+\text{H}_2=\text{C}+\text{H}_2\text{O}$ "

ac(13) : Carbon activity for the reaction " $\text{CH}_4=\text{C}+2 \text{H}_2$ "

Table 2.2 Corrosion test conditions

Test case		Gas composition (mol%)					Temp. (°C)	Press (MPa)	PO <sub>2</sub> (MPa)	ac (-)
		H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>				
Steam	1	100					900	0.2	∞	0
	2	100					800	0.2	∞	0
Hydrogen embrittlement	3		100				900	0.2	0	0
	4		100				700	0.2	0	0
Carburization	5	66.9	30.0		3.0	0.1	600	0.2	6.3E-25	20.2
Simulated process gas	6	47.0	47.0	1.0	2.5	2.5	900	0.2	8.3E-18	1.2

Table 2.3 Draft schedule of whole test program

Fiscal year		1997	1998	1999	2000	2001
Fabrication		—				
Corrosion test			—	— — — —	— — — —	—
Metallography			△	△ △	△ △	△
Strength test	Tensile			— —	— —	— —
	Fatigue			— —	— —	— —
	Creep			— —	— —	— —

Table 3.1 Interlock list

No.	Interlock	Alarm level	Measuring point
1	流路管内温度高	1050°C	流路管内試験片近傍(①)
2	流路管内温度高	1050°C	流路管内試験片近傍(②)
3	流路管表面温度高	1050°C	流路管外表面(①)
4	流路管表面温度高	1050°C	流路管外表面(②)
5	流路管表面温度高	1050°C	流路管外表面(③)
6	流路管表面温度高	1050°C	流路管外表面(④)
7	流路管表面温度高	1050°C	流路管外表面(⑤)
8	電気加熱炉ケーシング温度高	300°C	電気加熱炉ケーシング(①)
9	電気加熱炉ケーシング温度高	300°C	電気加熱炉ケーシング(②)
10	流路管入口フランジ温度高	350°C	流路管 上フランジ表面(①)
11	流路管入口フランジ温度高	350°C	流路管 上フランジ表面(②)
12	流路管出口フランジ温度高	150°C	流路管 下フランジ表面(①)
13	流路管出口フランジ温度高	150°C	流路管 下フランジ表面(②)
14	流路管出口温度高	100°C	ガス冷却器内部
15	蒸発器温度高	500°C	蒸発器表面
16	保温配管温度高	500°C	パージガス配管表面
17	可燃性ガス(H <sub>2</sub> )濃度高	1.0vol%	流路管 上フランジ 上部
18	毒性ガス(CO)濃度高	50ppm	流路管 下フランジ 下部
19	排風機風量低	50Pa	排気ダクト 排風機出口部

Table 4.1 Results of EDX analysis of oxidation test for 3000h exposure

Sample		Observation point		mass %				
				Si	Cr	Fe	Ni	Mo
Matrix				0.3	22.4	19.4	51.0	7.0
P r e c i p i t a t e s	Surface	Trans- granular	1	1.5	15.1	12.2	24.0	47.3
			2	1.7	15.3	11.6	22.5	48.9
			3	2.1	15.3	11.1	22.0	49.5
			4	1.3	17.0	13.8	26.0	42.0
		Inter- granular	5	0.3	64.9	5.2	6.3	23.3
			6	1.8	15.9	11.2	21.6	49.6
			7	1.6	16.2	11.8	23.1	47.4
			8	1.9	14.1	11.1	21.6	51.3
			9	1.9	15.2	11.3	21.5	50.1
	Center	Trans- granular	10	0.2	64.1	5.6	6.5	23.6
			11	0.3	65.2	5.0	6.4	23.1
			12	1.8	16.1	11.2	21.4	49.5
			13	1.8	15.9	11.2	21.9	49.3
		Inter- granular	14	0.3	66.0	4.8	6.5	22.5
			15	0.4	65.1	5.4	6.2	23.0
			16	1.9	16.1	11.7	21.5	48.7
			17	1.8	15.9	11.5	22.0	48.8

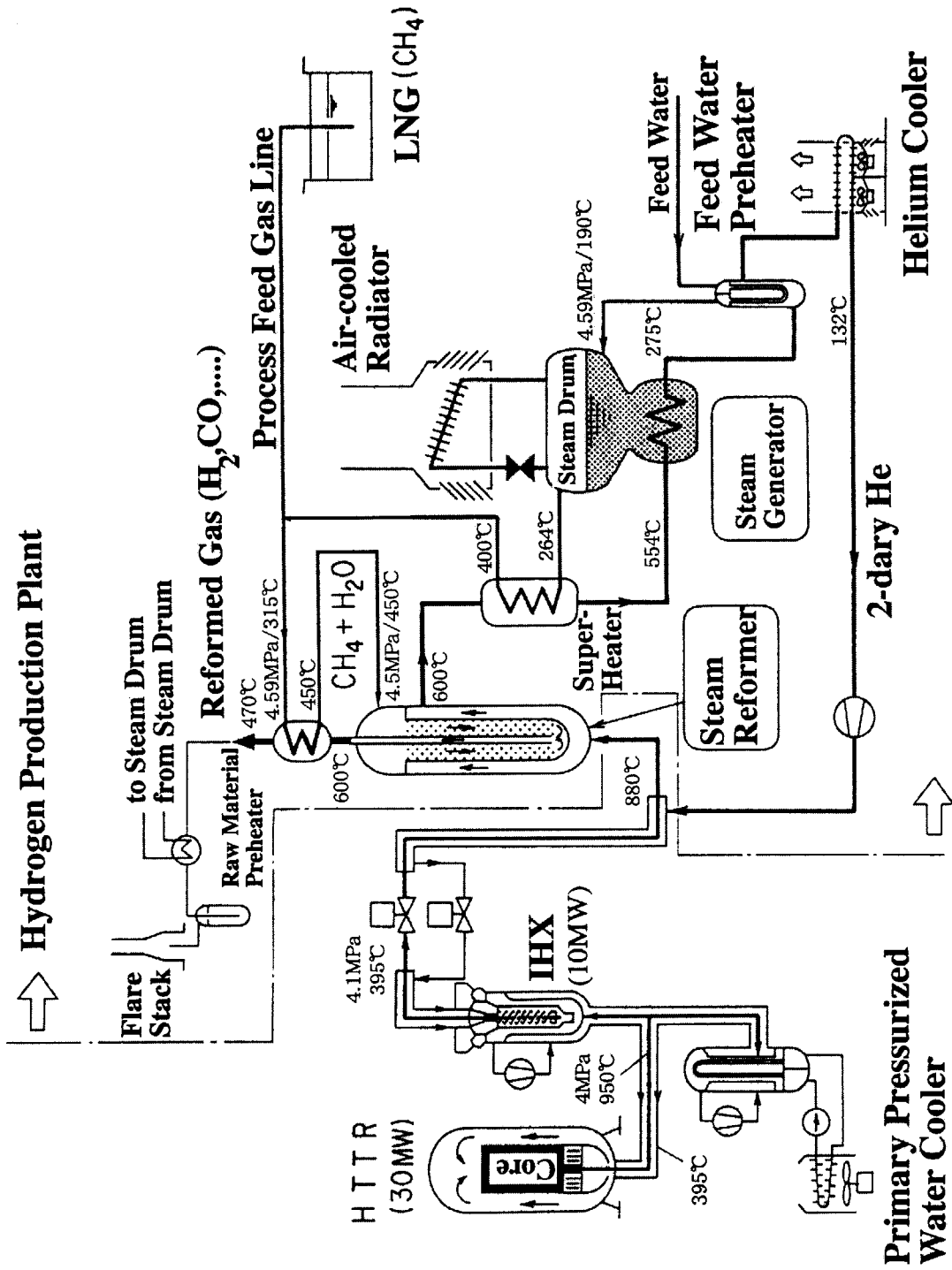


Fig. 1.1 Flow scheme of the HTTR steam reforming system



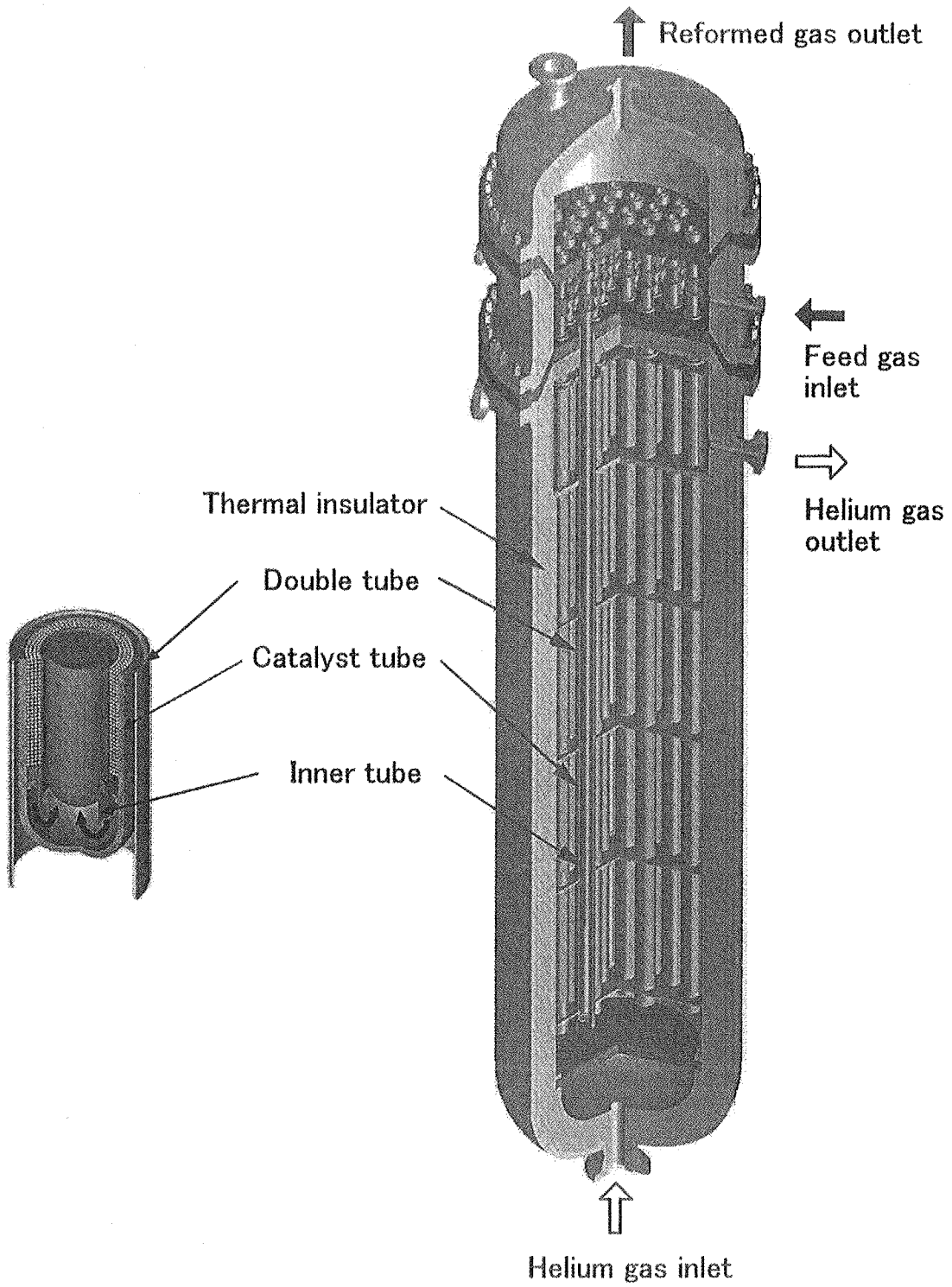


Fig.1.2 Steam reformer

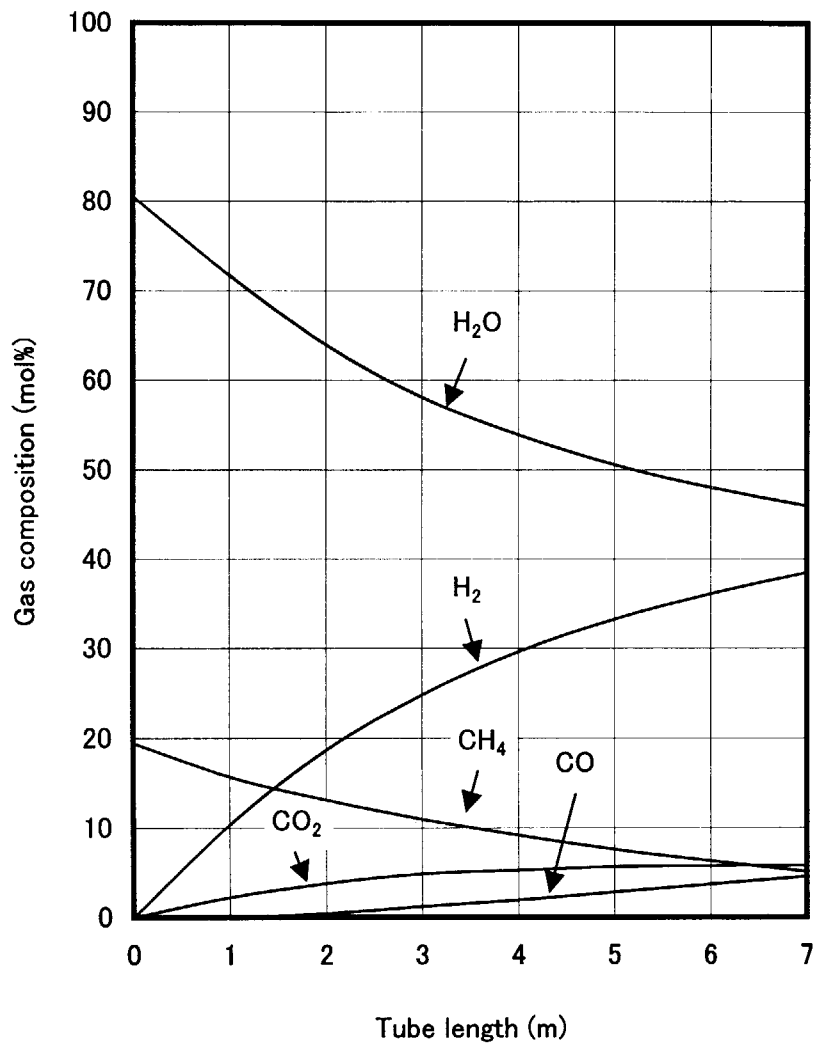


Fig. 2.1 Gas composition

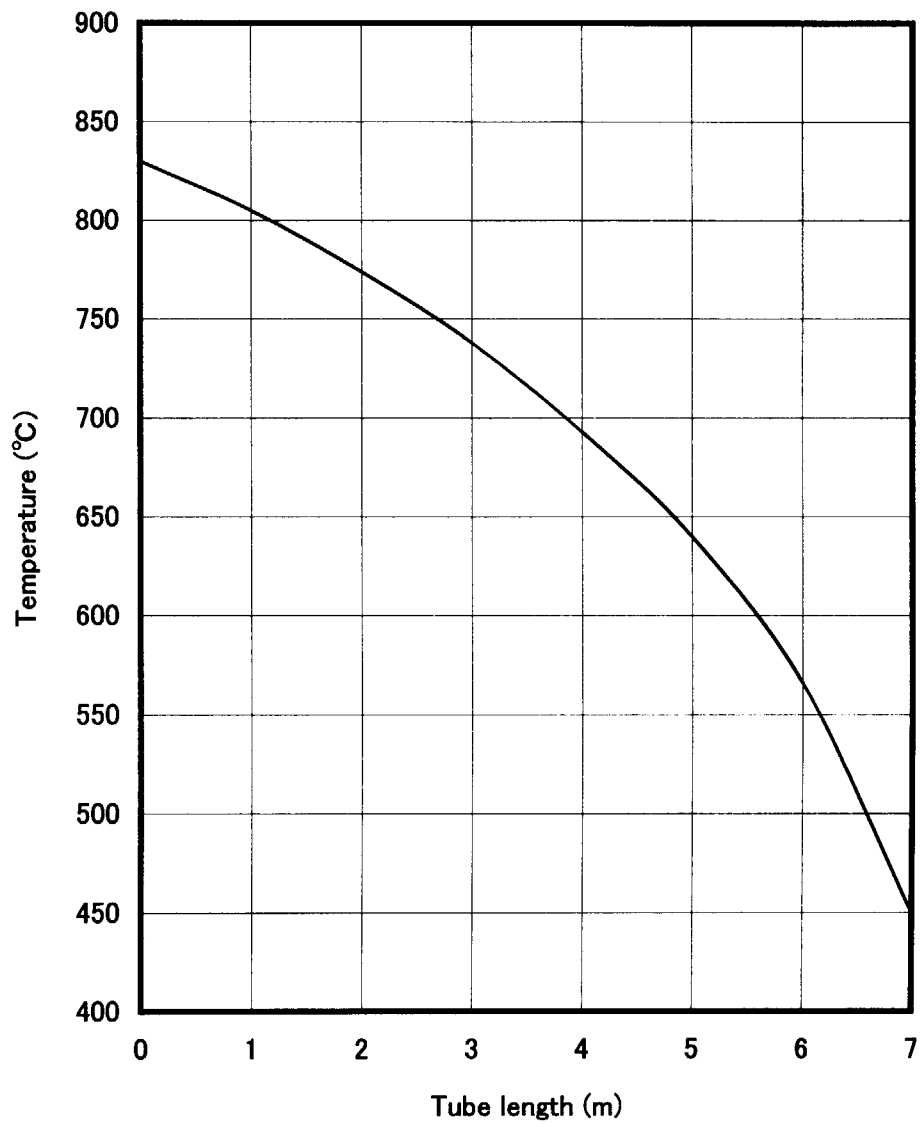


Fig. 2.2 Temperature distribution along tube length

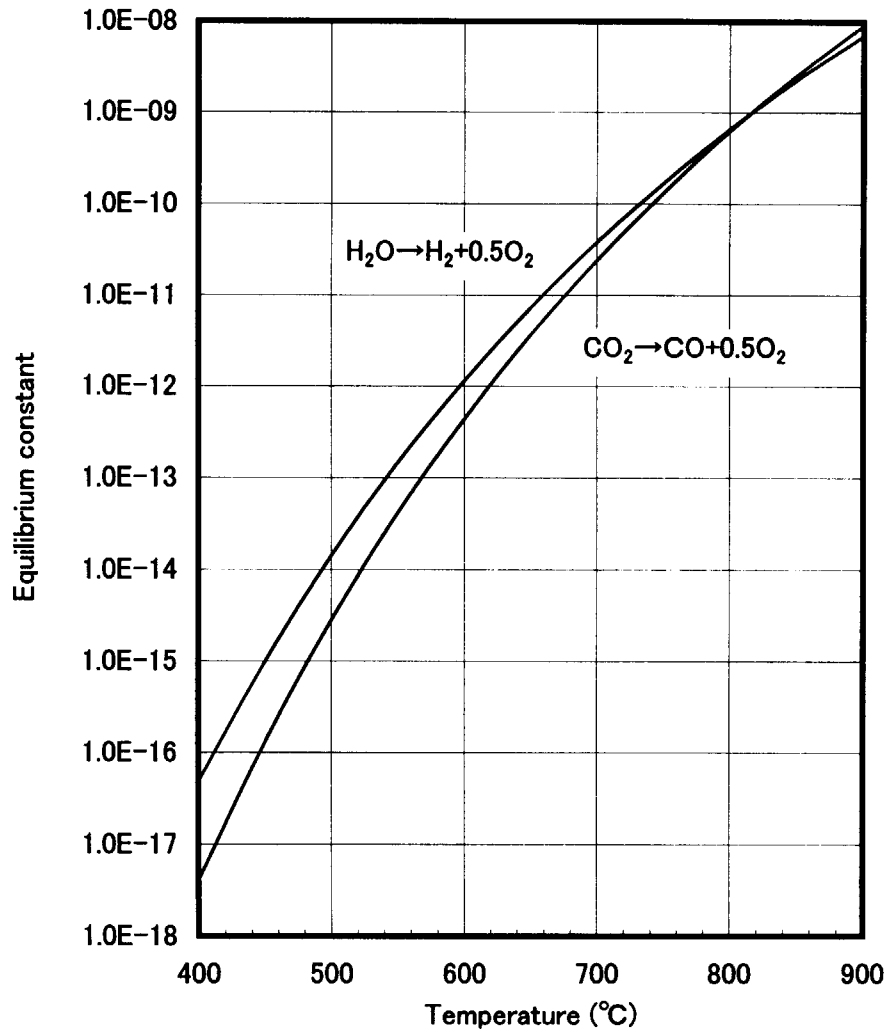


Fig.2.3 Equilibrium constant for oxygen partial pressure

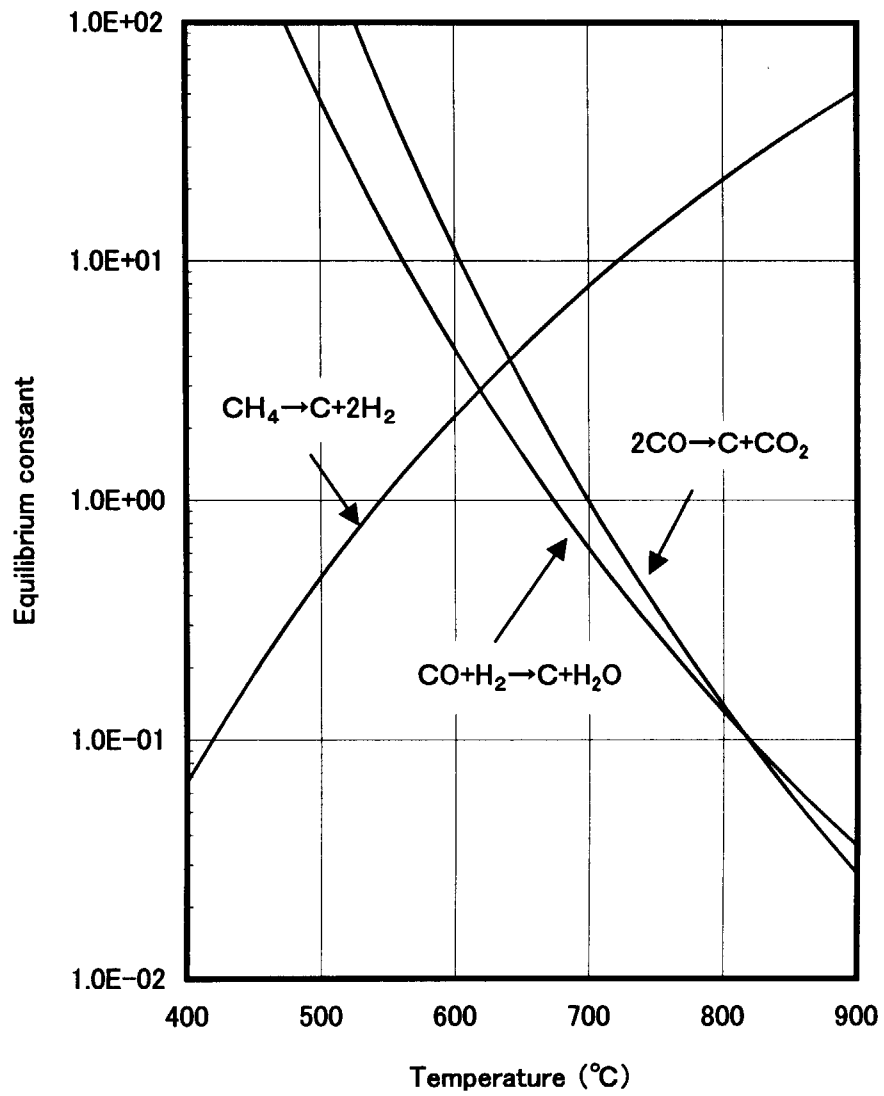
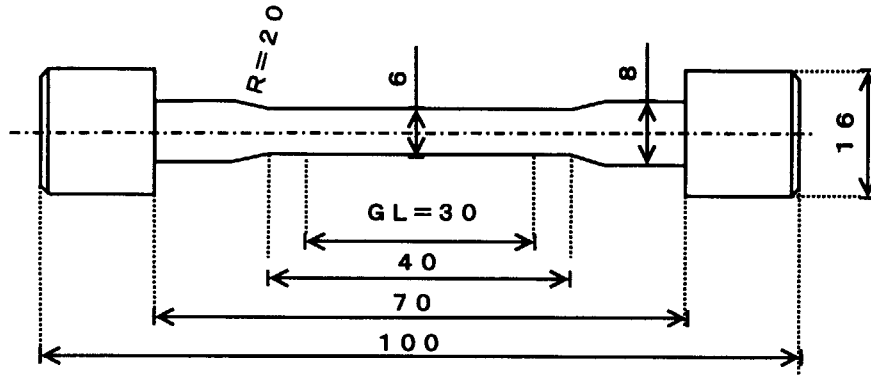
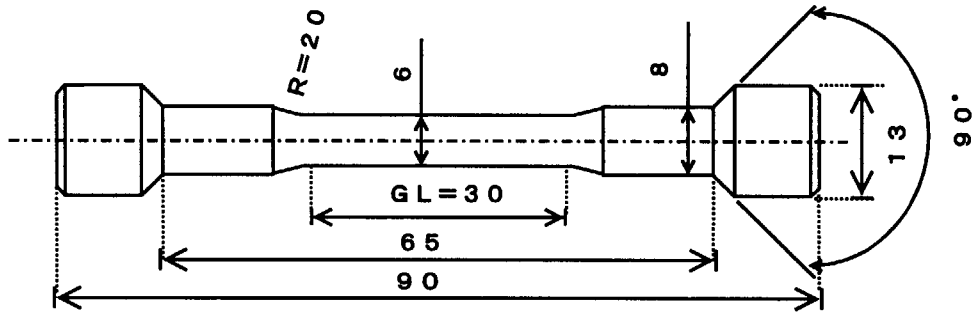


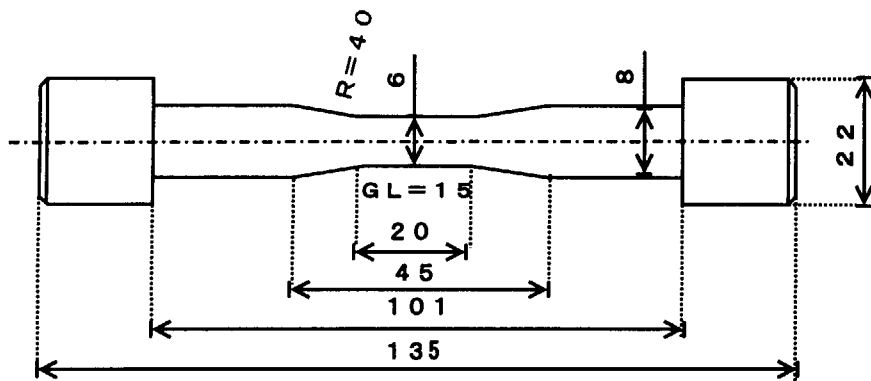
Fig.2.4 Equilibrium constant for carbon activity



(a) 引張試験片



(b) クリープ試験片



(c) 疲労試験片

Fig.2.5 Geomery of specimens

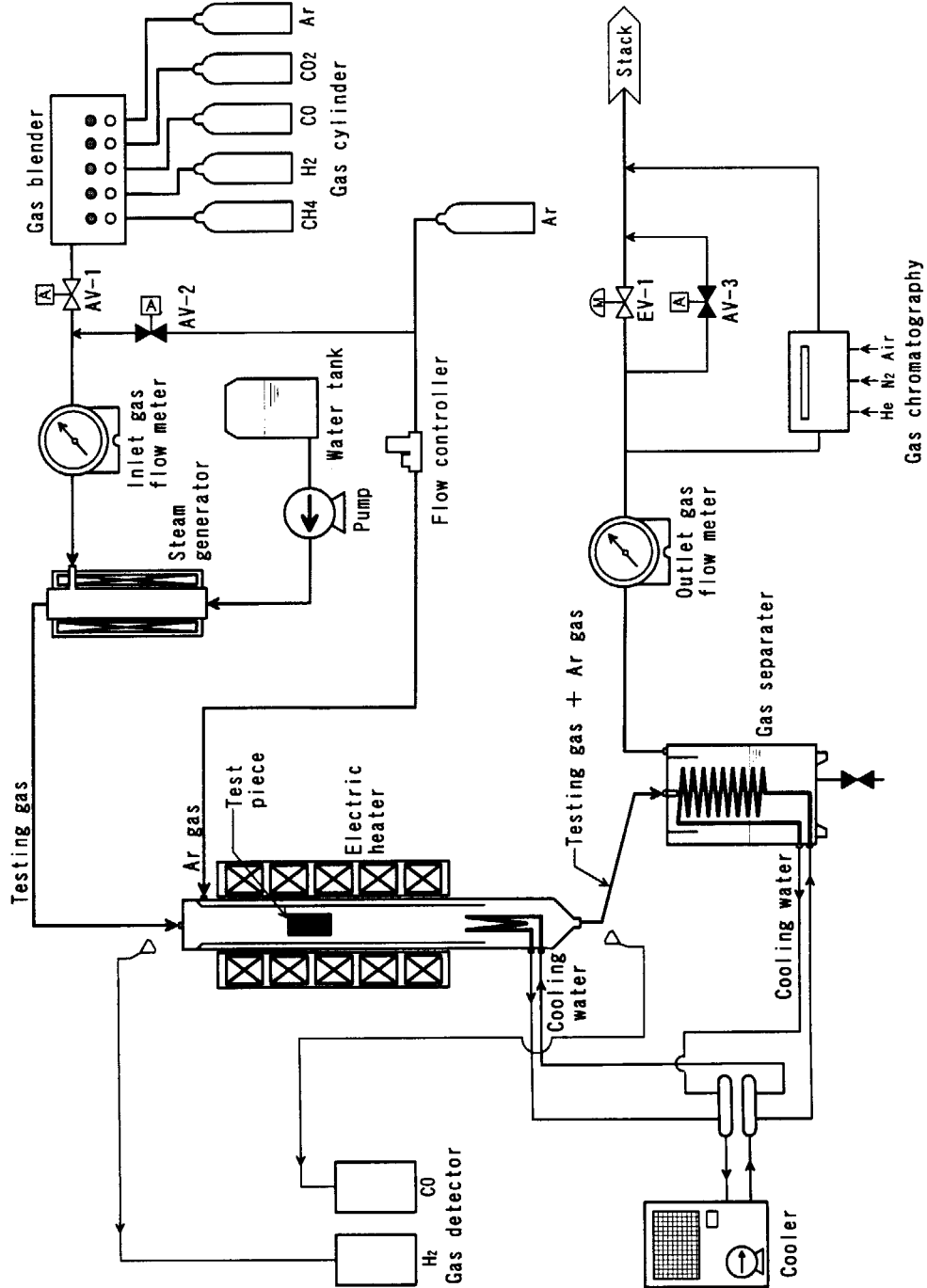


Fig.3.1 Schematic flow diagram of corrosion test apparatus

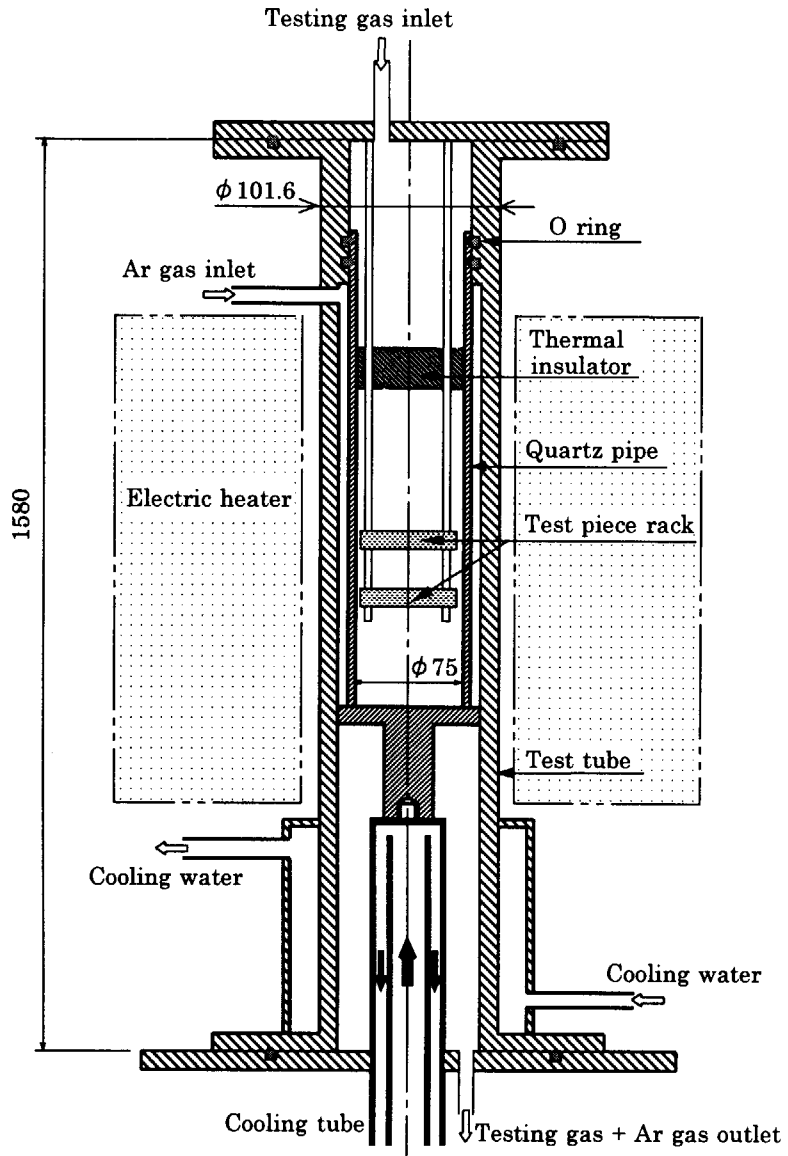


Fig.3.2 Test section of corrosion test apparatus



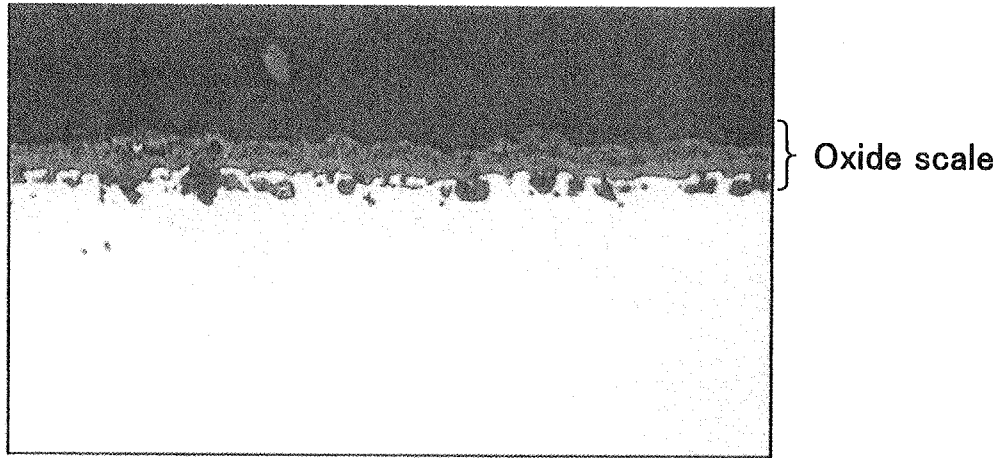


Fig. 4.1 Photograph of cross section for 3000h exposure

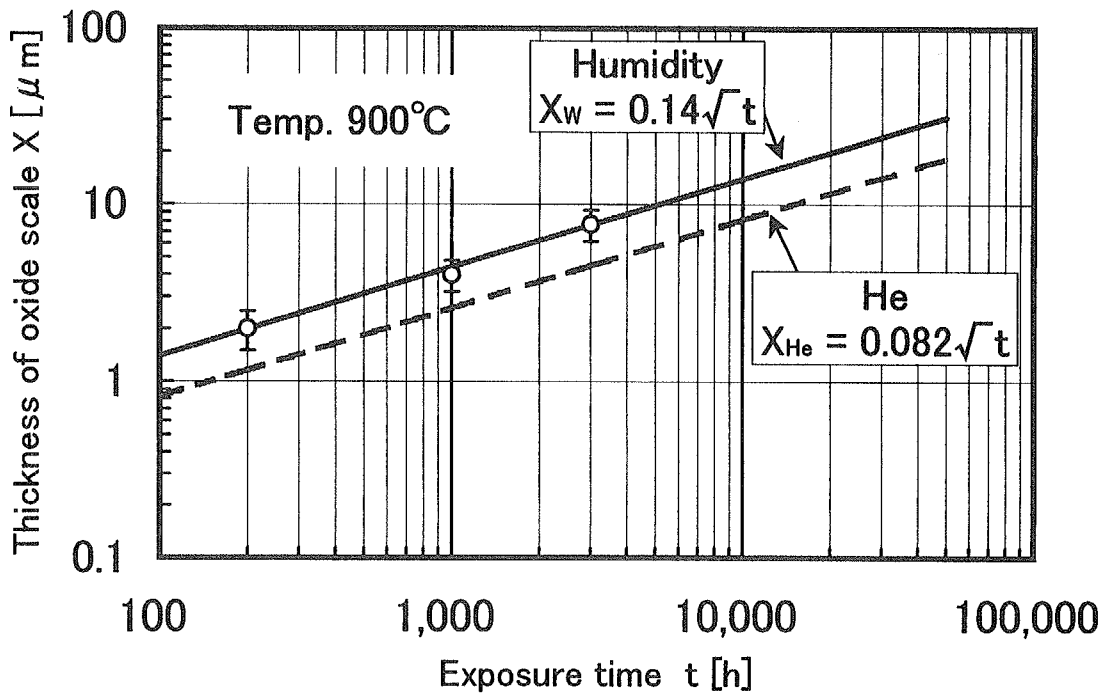


Fig. 4.2 Oxidation rate in humidity atmosphere

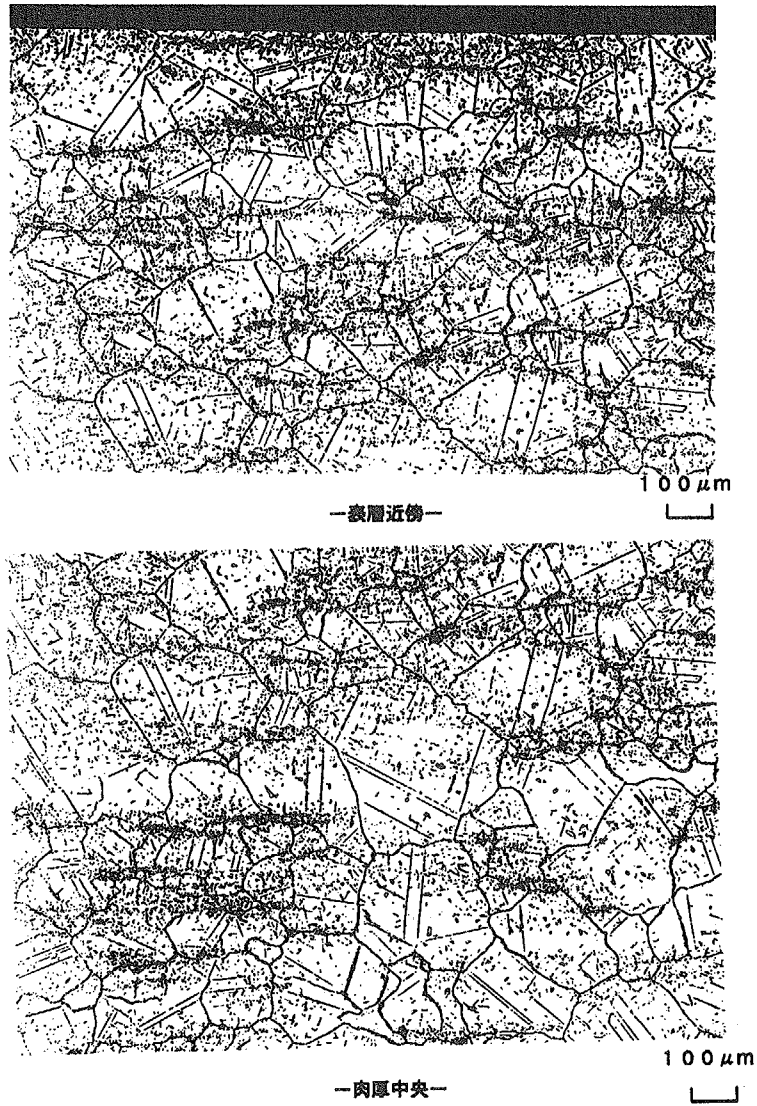
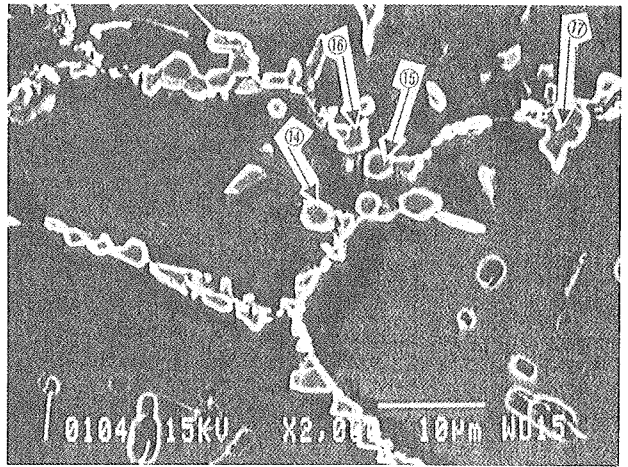
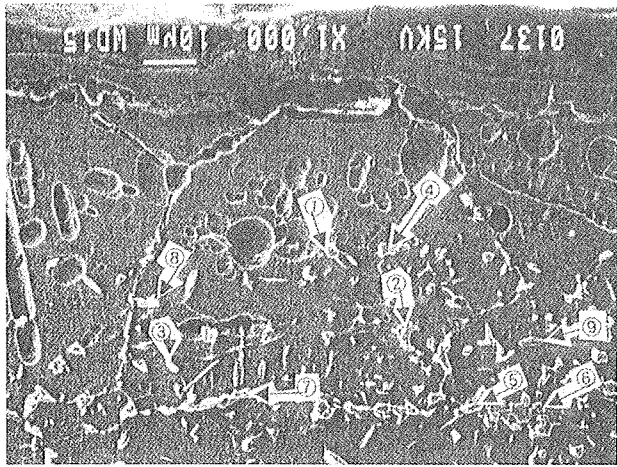
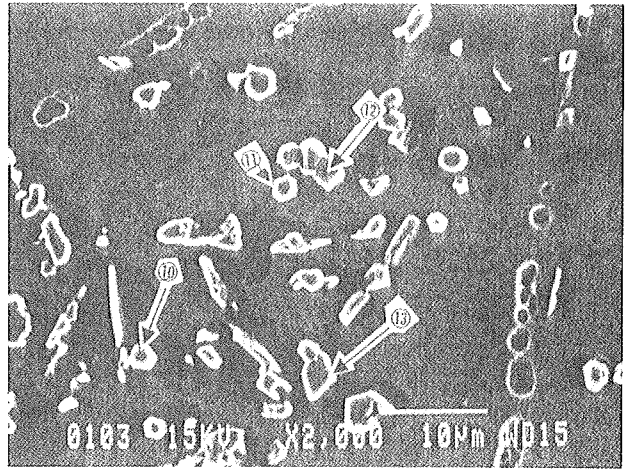
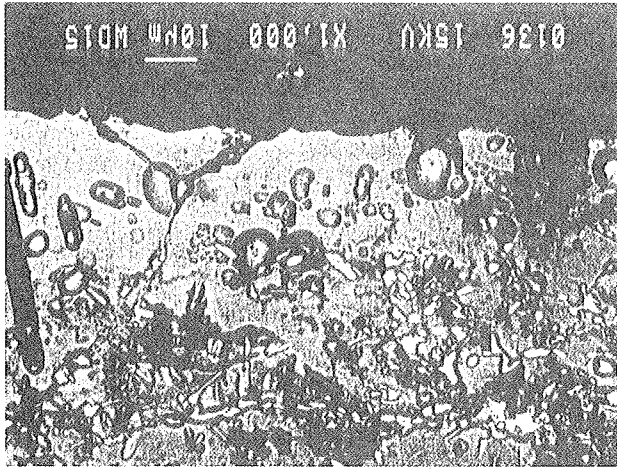


Fig. 4.3 Photomicrographs of cross section for 3000h exposure



(a) Surface

(b) Center

Fig. 4.4 Photographs of SEM for 3000h exposure

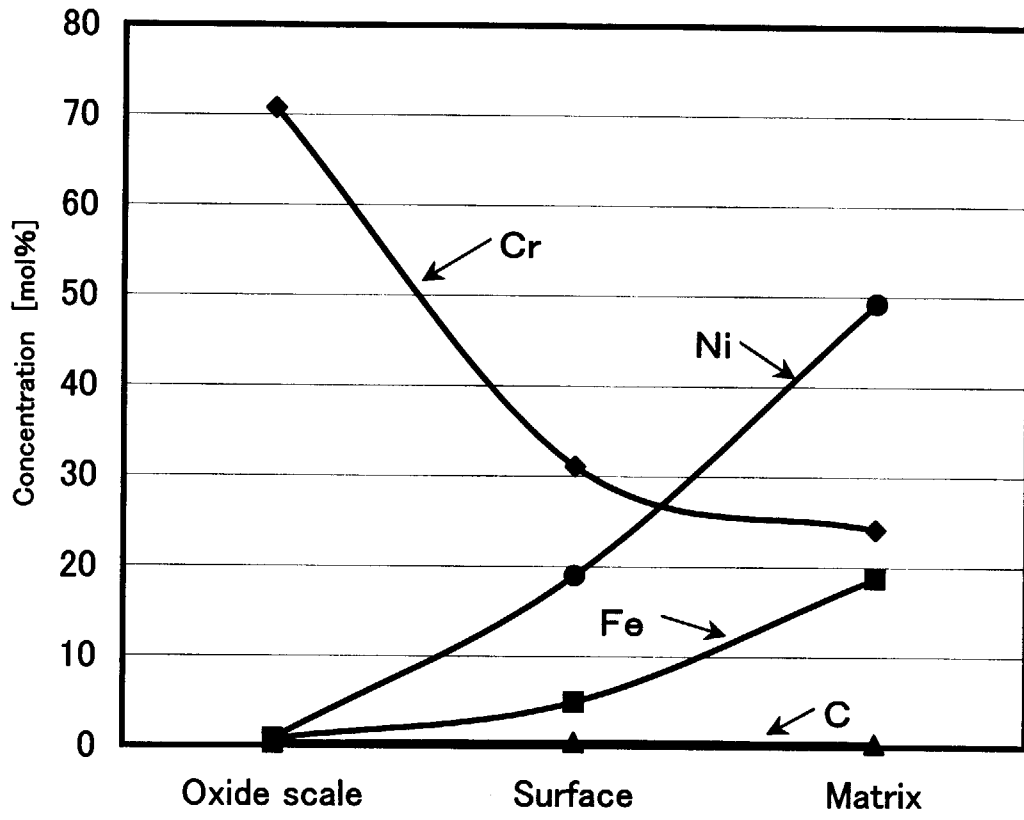


Fig. 4.5 Change of concentration of major elements due to oxidation

# 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

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	ジーメンズ	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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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	b
バル	bar
ガール	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 = 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

(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, 1 eV および 1 u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。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 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 (=1 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>4</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>3</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	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>3</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	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>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

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

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

HTTR水素製造システムの水蒸気改質器触媒管健全性試験①全体計画、試験装置の製作(受託研究)