

JAERI-Tech
2002-090



JP0250570



HTTR水素製造システムの
水素同位体透過に関する研究
—(II) 酸化膜による重水素透過の低減効果—
(受託研究)

2002年11月

武田 哲明・岩月 仁*・西原 哲夫

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。

入手の問合せは、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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

HTTR水素製造システムの水素同位体透過に関する研究
— (II) 酸化膜による重水素透過の低減効果 —
(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
武田 哲明・岩月 仁*・西原 哲夫

(2002年10月1日受理)

日本原子力研究所では、核熱を用いた水素製造システムの開発研究を文部科学省からの受託研究として進めている。高温工学試験研究炉(HTTR)に接続する水素製造システムでは、中間熱交換器の伝熱管や水蒸気改質器の触媒管に使用される高温耐熱合金中の水素同位体透過が重要な問題となる。そこで、安全審査や数値解析コードの開発に必要なデータを取得するため、機器要素試験の一つとして水素透過試験を実施した。本研究の目的は、ハステロイXRや他の高温耐熱合金に対する水素同位体透過係数を取得するとともに、酸化膜が水素同位体透過量の低減効果に及ぼす影響を定量的に評価することである。試験の結果から、原子炉運転初期に伝熱管表面に形成される酸化膜により、HTTR1次系から熱利用系に透過するトリチウム透過量は低減されると予想される。本報告書は、伝熱管表面に酸化膜が形成された場合のハステロイXRに対する水素と重水素透過量の低減効果と酸化膜の形成状態についてまとめたものである。

本研究は文部科学省の受託研究「核熱利用システム技術開発」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

*石川島播磨重工業(株)

Study on Hydrogen Isotope Permeation in the HTTR Hydrogen Production System

(II) : Effectiveness of Reducing the Amount of Permeated Deuterium by Oxidized Film
(Contract Research)

Tetsuaki TAKEDA, Jin IWATSUKI* and Tetsuo NISHIHARA

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

(Received October 1, 2002)

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has performed a research and development (R&D) program on nuclear production of hydrogen as a study consigned by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Permeation of hydrogen isotope through a high-temperature alloy as used a heat transfer pipe of an intermediate heat exchanger and a steam reformer is an important problem in the hydrogen production system connected to be the high-temperature engineering test reactor (HTTR). In order to obtain detailed data for safety review and development of analytical codes, a test of permeation of hydrogen isotope was carried out as one of essential tests. The objective of this study is to obtain a permeability of hydrogen isotope through Hastelloy XR and other high temperature alloys and to evaluate quantitatively an effect of oxidized film on reducing the amount of permeated hydrogen through the pipe. From the results obtained in this experiment, it is supposed that the oxidized film produced on the surface of the heat transfer pipe during an early stage of the reactor operation will reduce the amount of tritium permeated from the primary circuit of the HTTR to the utilization system. This report describes the amount of permeated hydrogen and deuterium through Hastelloy XR with oxidized film on the tube surface and state for production of oxidized film.

Keywords: Permeability, Hydrogen, Deuterium, Oxidized Film, Hastelloy XR, Hydrogen Production System, HTTR Reactor

Present study is entrusted from Ministry of Education , Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

*Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目 次

1. 序論	1
2. 水素同位体透過試験	3
2.1 水素同位体透過現象	3
2.2 試験装置の概要	3
2.3 試験条件と試験方法	4
3. 試験結果と考察	13
4. 結論	43
謝辞	43
参考文献	44

Contents

1. Introduction	1
2. Experiments on Permeation of Hydrogen Isotope	3
2.1 Phenomenon of Permeation of Hydrogen Isotope	3
2.2 Outline of Experimental Apparatus	3
2.3 Experimental Condition and Procedure	4
3. Experimental Results and Discussions	13
4. Conclusion	43
Acknowledgement	43
References	44

This is a blank page.

1. 序 論

日本原子力研究所(以下、原研と称す)では、高温ガス炉の熱利用系として、高温の核熱により水素を製造するシステムを検討している。そのうちの一つである高温工学試験研究炉(HTTR)を用いたメタンによる水蒸気改質水素製造システム(以下、HTTR水素製造システムと称す)の技術開発⁽¹⁾では、システム設計研究⁽²⁾、炉外実証試験⁽³⁾、および機器要素試験として水素透過試験^(4,5)、触媒管健全性試験⁽⁶⁾と高温隔離弁⁽⁷⁾に関する試験を進めている。HTTRに接続する水素製造システムでの放射性物質の放出に関する課題として、トリチウム・水素移行の問題がある。Fig.1 にHTTR水素製造システム内のトリチウム・水素移行過程の概略を示す。HTTRの炉心で発生したトリチウムは、中間熱交換器の伝熱管を通して1次冷却系から2次冷却系へ透過し、さらに水蒸気改質器の触媒管を透過するため、製品として生成する水素中にトリチウムが混入することになる。

一方、HTTRから水蒸気改質器へのトリチウム透過とは逆に、水蒸気改質器で生成された水素が触媒管を透過して2次冷却系に移行し、さらには中間熱交換器の伝熱管を透過して1次冷却系のヘリウムガス中に混入することが予想される。この場合は、炉心部に水素が浸入し、炉心部の黒鉛と水素との反応による不純物の生成や1次冷却材中の不純物濃度上昇による純化能力低下等の問題を生じる可能性がある。現在のHTTR1次ヘリウム純化設備では水素濃度を 3ppm 以下⁽⁸⁾に抑えられるよう設計されており、この濃度以下では炉心部の黒鉛構造物に対して悪影響を及ぼさないとしている。しかしながら、これはHTTRと水素製造システムとの接続を想定していない場合であり、今後、水素製造システムを接続するために、中間熱交換器伝熱管や水蒸気改質器触媒管を透過する水素量を定量的に評価できる技術開発が必要である。

そこで、HTTR水素製造システム内のトリチウム・水素移行量及び製品水素中のトリチウム混入量を定量的に評価するためには、HTTRの中間熱交換器の伝熱管に採用され、HTTRに接続する水素製造システムの水蒸気改質器触媒管の候補材として検討されているハステロイXRの水素同位体透過係数をHTTR水素製造システムの製作に先立って取得する必要がある。

本試験では、高温条件下におけるハステロイXRの水素同位体透過係数を求めるとともに、水素同位体の対向透過や酸化膜による水素透過の低減効果を調べ、HTTR水素製造システム内のトリチウム・水素移行過程の定式化を目的としている。我々は既にハステロイXRとインコネル600に対する水素・重水素透過係数⁽⁴⁾、及び水素同位体対向透過試験の結果⁽⁵⁾について報告した。本報告書では、純度管理された高温のヘリウムガス雰囲気においてハステロイXR製円管の表面に酸化膜が自然形成された場合の重水素透過係数と酸化膜による透過量の低減効果についてまとめたものである。

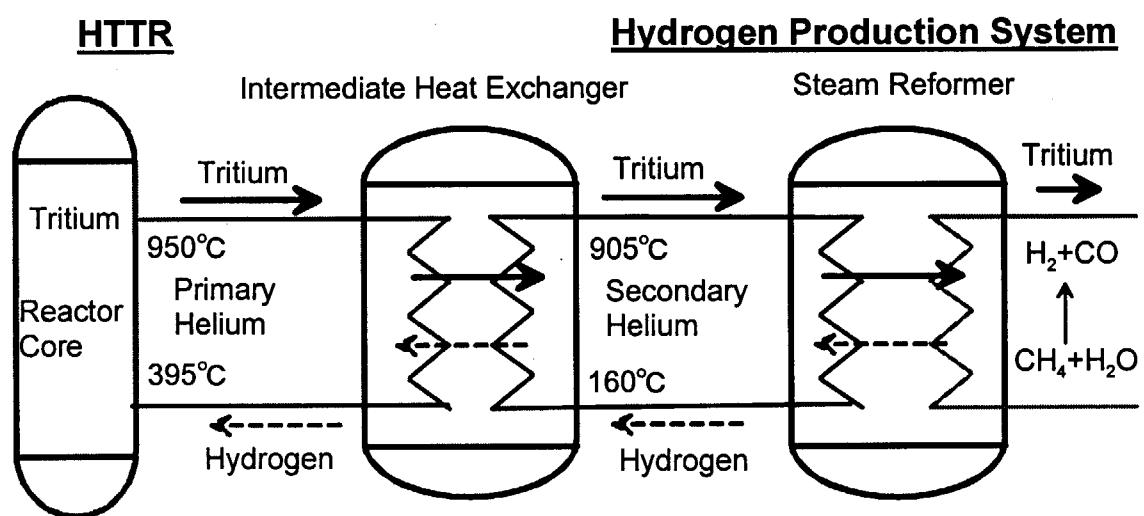


Fig. 1 Tritium and hydrogen permeation process in the HTTR hydrogen production system

2. 水素同位体透過試験

2.1 水素同位体透過現象

金属中を水素が透過することはよく知られた現象であり、金属表面での吸着・脱離および金属中の拡散挙動が支配的な現象⁽⁹⁾であるとされているが、特に吸着から拡散に至る表面過程を速度論的に忠実に取り扱うのは困難であるとされ⁽¹⁰⁾、表面反応は物質拡散に比べて十分速い現象と仮定する場合が多い。これまでの研究^{(11)~(13)}では、水素透過の支配現象について、透過に対する2つの律速過程と酸化膜による透過低減効果が Fig.2.1 のように示されている。比較的高分圧(約 10Pa 以上)とされる圧力領域では、金属壁を透過する水素量は透過に対して、上流側と下流側水素分圧の平方根の差に比例する金属内拡散律速の領域であるとされ、比較的低分圧の場合は透過量が分圧の1乗の差に比例する化学吸着律速領域であるとされている。また、表面に酸化膜が形成されている場合には水素分子が解離せずに吸着するため、水素は分子状態で酸化膜内を拡散し、酸化膜の形成状態により水素分圧の 0.5 から1乗の範囲内の値をとるとされている。

すでに得られている主な耐熱合金の水素透過係数を Fig.2.2 に示し、アレニウス型にまとめられた水素透過係数の頻度因子と活性化エネルギーを Table 2.1 に示す。インコロイ系の高温耐熱合金に対する水素・重水素の透過係数^{(11), (14)~(16)}については、数多く報告されており、ハステロイ系合金に関する報告^{(11), (16), (17)}は数件見られる程度である。増井ら⁽¹⁶⁾は当時高温ガス炉に使用される可能性があった耐熱合金であるHK40、インコロイ800、ハステロイX、インコネル600について 800°C~1000°Cにおける透過係数を求めている。合金中のニッケル(Ni)含有率の増加に従ってニッケルの水素透過係数⁽¹⁸⁾に近づき、活性化エネルギーは小さくなるとしている。Table 2.2 に本試験で得られたハステロイXRとインコネル600の水素・重水素透過係数の頻度因子と活性化エネルギーをまとめ、Fig.2.3 に試験管平均温度の逆数に対する透過係数を示す。

2.2 試験装置の概要

試験装置の写真及び概略図を Fig.2.4, Fig.2.5, Fig.2.6 に、主要仕様を Table 2.3 に示す。以下では試験装置の概略を述べるが、詳細については前報⁽¹⁹⁾を参照されたい。試験装置は、透過試験管(内管)、測定管(外管)及び電気炉からなる試験体、気体供給・バージ・排気系、濃度測定系、真空系、冷却水系、電気計装系で構成されている。ハステロイXRをはじめとする高温耐熱合金を試験管として、電気ヒータにより加熱された試験管から透過する水素同位体の分圧を質量分析計により測定する装置である。

本試験で対象とする水素分圧条件では、熱交換器の伝熱管内外、改質器の触媒管内外に水素を含む混合気体が定常的に流れしており、供給側の水素分圧を一定に保持することを容易にするため、測定管内に透過試験管を貫通させた二重管構造とし、試験管内外に一定の圧力、流量で気体を流す方法を採用した。内管側の透過試験管は内径 24.8mm、肉厚 3.5mm のハステロイXRであり、HTTRの中間熱交換器伝熱管と同じ寸法である。外管の測定管は測定精度向上のために測定管外側への水素透過を

防ぐ必要があったが、水素を含む混合気体の全圧が大気圧以上の場合を模擬する必要があるため、既に水素透過係数が得られているハステロイXとし、内径は 50mm、肉厚は 3mm とした。電気炉出力は 6kW とし、加熱領域を鉛直方向に3分割して、それぞれ独立に制御することが可能である。

測定管内の不活性気体を定常流動させた状態で、試験管を透過してきた水素量を測定する際には流量を大きくとると検出量が小さくなり、その結果として測定精度が悪くなる。そこで、予備解析⁽²⁰⁾の結果から、数十秒で測定管内を気体が流れる時の流量を最大値に設定して体積流量制御範囲を定め、20°C、1気圧において 0~1000cc/min とした。系統の配管材質はステンレス鋼に比べて水素吸着量が少ない銅を採用した。水素透過量の測定は4重極質量分析計を用いて行った。気体濃度は 1ppm、水分濃度は 500ppb まで測定可能である。濃度測定点は気体供給系出口、透過試験管出口及び測定管出口の3点に設けた。装置各部の温度測定用に 0.4 級のK型熱電対、ヒータ制御用に 0.25 級のR型熱電対を使用し、温度測定精度は±0.5°C 以内である。

2.3 試験条件と試験方法

重水素を用いた透過試験の条件を Table 2.4 に示す。試験管は純度 99.995%以上のヘリウムガス雰囲気にて、600°C~850°C の温度範囲で約 150 時間加熱後のハステロイXR管を使用した。さらに、重水素透過試験終了後、この試験管に対し 1000 時間および 3000 時間の加熱処理を実施した。加熱温度は 850°C、ヘリウムガス流量は 100cc/min とした。供給系とパージ系の流量は 500cc/min とし、試験管の加熱温度は 700°C~850°C を 50K 刻みで設定した。

本試験では、自然形成された酸化膜による透過量の低減が予想されるため、供給ガスに水素を用いた場合は水素透過量に対して大気中に含まれる微量の水素量を無視できなくなり、測定誤差が相対的に増大する。そこで、より精度よく透過量を求めるために、大気中にはほとんど存在しない重水素を供給ガスに用いた。アルゴンバランスの重水素混合ガスにおける重水素濃度は $9.91 \times 10^2 \text{ ppm} \sim 3.93 \times 10^4 \text{ ppm}$ とした。

透過した重水素濃度を求めるため、あらかじめガスクロマトグラフにより重水素濃度が求められた標準気体を用いて質量分析計により求まる重水素分圧から重水素濃度に換算する際の変換係数を求める校正試験を実施した。校正試験は、試験部を加熱しないで透過試験管と測定管との環状流路部に試験時のパージ気体流量に等しい流量で標準気体を流し、質量分析計で測定される重水素分圧値が安定するまで試験を継続した。この場合、試験管温度はほぼ常温であることから水素透過量は無視できるほど小さく、重水素分圧値と標準気体の重水素濃度とが等しいことから分圧-濃度変換係数を求めることができる。この質量分析計は試験条件である比較的低水素分圧の範囲においては分圧と濃度に線形な関係のあることが示されている。したがって、変換係数は校正試験結果を用いて一度求めれば十分であるが、可能な限り測定精度を向上させるため、試験条件を変更するたびに校正試験を実施した。各試験前に求めた変換係数はそれらの平均値に対して 3% 以内の誤差であった。

以下に透過試験の手順を示す。

- ① 透過試験管及び透過試験管と測定管との間の環状流路部にヘリウムガスを所定の流量で流しながら

ら、試験体を加熱する。

- ② 透過試験管の温度が設定値に達し、30分以上温度が一定となった時点を定常状態と仮定する。この状態で、透過試験管側に水素混合気体を一定流量で供給する。
- ③ 環状流路内の気体を質量分析計へ連続的にサンプリングしながら質量分析を行い、水素分圧を測定する。
- ④ 水素分圧が一定値に安定すれば、各部温度、水素分圧データを取得する。
- ⑤ データ取得後、供給系にヘリウムガスを流し、水素混合気体を排気する。
- ⑥ 排気処理終了後、気体供給・ページ・排気系を閉じる。
- ⑦ ヒータ出力の自動制御により、試験体を冷却する。このとき、試験体の冷却に伴い、試験部内圧力が低下するため、大気圧以下にならないよう試験部にヘリウムガスを注入する。
- ⑧ 冷却終了後、系内圧力が大気圧以上となるよう試験部内にヘリウムガスを充填し、実験を終了する。

Table 2.1 Hydrogen permeability of high-temperature alloys

No.	High-temperature alloy	Pre-exponential factor K_0 [cm ³ (NTP)·cm ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ^{-0.5}]	Activation energy E_0 [kJ·mol ⁻¹]	Temperature T [°C]	Ref.
1	Nickel	7.73×10^{-5}	54.84	-	[18]
2	Inconel-600	2.22×10^{-4}	66.14	800-1000	[16]
3	Incoloy-600	1.00×10^{-4}	64.05	700-950	[15]*
4	Incoloy-800	2.13×10^{-4}	69.07	800-1000	[16]
5	Incoloy-800	5.45×10^{-5}	64.05	700-950	[15]*
6	Incoloy-800	2.31×10^{-4}	74.1	600-950	[14]
7	Incoloy-800	9.77×10^{-5}	74.1	649	[11]**
8	Hastelloy-N	2.59×10^{-4}	77.99	605	[11]**
9	Hastelloy-X	5.62×10^{-5}	58.2	400-600	[17]
10	Hastelloy-X	2.00×10^{-4}	66.98	800-1000	[16]

* Some oxide film influence suspected.

** For deuterium

Table 2.2 Activation energy and pre-exponential factor of H₂ and D₂ permeability

High-temperature Alloy	Gas species	Temperature [°C]	Partial pressure [Pa]	Activation energy [kJ·mol ⁻¹]	Pre-exponential factor [cm ³ (NTP)·cm ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ^{-0.5}]
Hastelloy XR	H ₂	570-820	3.95×10^3	67.5	1.02×10^4
↑	↑	↑	1.01×10^3	68.1	1.01×10^4
↑	↑	↑	1.06×10^2	66.0	7.8×10^{-5}
↑	↑	↑	Average	67.2 ± 1.2	$(1.0 \pm 0.2) \times 10^{-4}$
↑	H ₂ *	↑	1.06×10^2	70.2 ± 2.0	$(4.7 \pm 0.4) \times 10^{-5}$
↑	D ₂	670-820	4.04×10^3	76.1	2.31×10^4
↑	↑	↑	9.89×10^2	76.9	2.63×10^4
↑	↑	↑	Average	76.6 ± 0.5	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^4$
Inconel 600	H ₂	669-819	1.05×10^3	69.1 ± 1.2	$(1.9 \pm 0.4) \times 10^4$
↑	D ₂	↑	9.98×10^2	74.7 ± 0.5	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^4$

* : Some oxide film influence suspected.

Table 2.3 Main specifications of experimental apparatus

Test section	: coaxial double pipe and electric furnace
Permeation test pipe (inner)	: 24.8 mm I.D., 31.8 mm O.D. 3.5 mm thickness, 1000 mm length
Pipe material	: Hastelloy XR
Measuring pipe (outer)	: 50 mm I.D., 56 mm O.D. 3 mm thickness, 1000mm length
Pipe material	: Hastelloy X
Working fluid	: Hydrogen, Deuterium, Helium, Argon, Nitrogen
Electric furnace	: Main heater 2kW×3 regions (vertical direction) Pre-heater 1kW×2 parts (supply and purge lines)
Maximum temperature	: 900°C
Maximum pressure	: 1MPa
Flow rate of gas	: 100cc(NTP) ^{(*)1} /min
Hydrogen measurement system	: quadrupole mass spectrometer (*1) normal condition (20°C, 0.1MPa)

Table 2.4 Experimental condition of deuterium permeation

No.	Test Pipe No.	Heating Time [h]	Set Temp. [°C]	D ₂ Conc. [ppm]	D ₂ Press. [Pa]
OD-1	TP-1	150	850	1.01×10 ⁴	1.01×10 ³
OD-2	TP-1	150	850	9.91×10 ²	9.91×10 ¹
OD-3	TP-1	150	850	9.91×10 ²	9.91×10 ¹
OD-4	TP-2	1000	850	1.01×10 ⁴	1.01×10 ³
OD-5	TP-2	1000	850	9.91×10 ²	9.91×10 ¹
OD-6	TP-3	3000	850	3.93×10 ⁴	3.93×10 ³
OD-7	TP-3	3000	800	3.93×10 ⁴	3.93×10 ³
OD-8	TP-3	3000	750	3.93×10 ⁴	3.93×10 ³
OD-9	TP-3	3000	700	3.93×10 ⁴	3.93×10 ³
OD-10	TP-3	3000	850	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-11	TP-3	3000	850	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-12	TP-3	3000	850	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-13	TP-3	3000	850	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-14	TP-3	3000	800	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-15	TP-3	3000	750	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-16	TP-3	3000	700	9.90×10 ³	9.90×10 ²
OD-17	TP-3	3000	850	1.01×10 ³	1.01×10 ²
OD-18	TP-3	3000	850	1.01×10 ³	1.01×10 ²
OD-19	TP-3	3000	850	1.01×10 ³	1.01×10 ²
OD-20	TP-3	3000	850	1.01×10 ³	1.01×10 ²

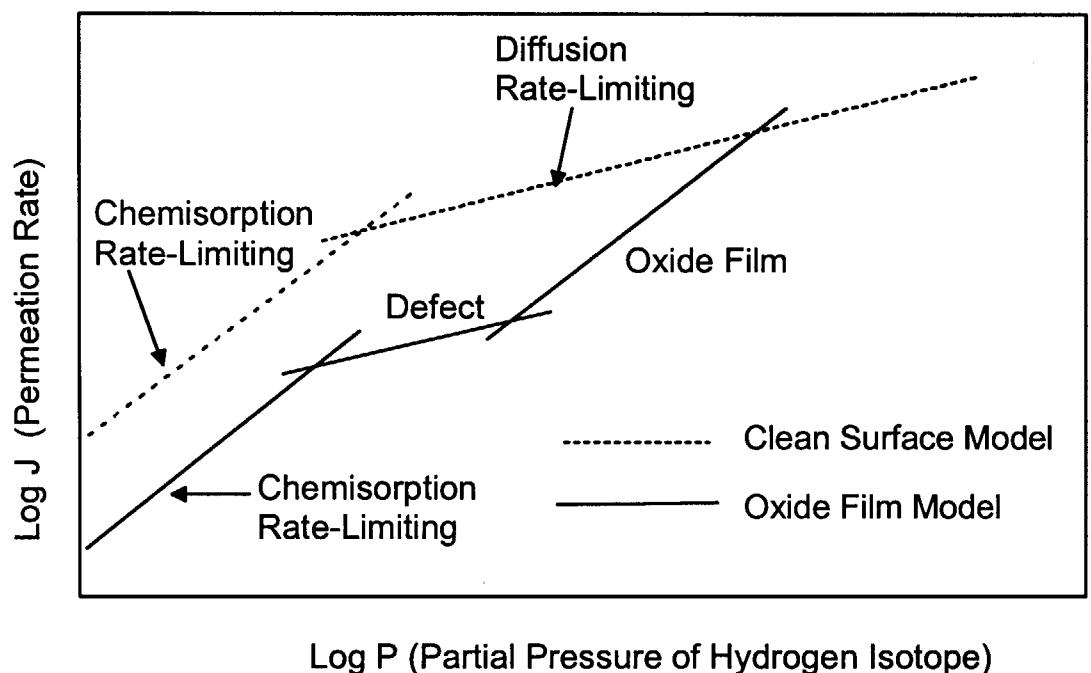


Fig.2.1 Rate-limiting steps for permeation [Ref.12]

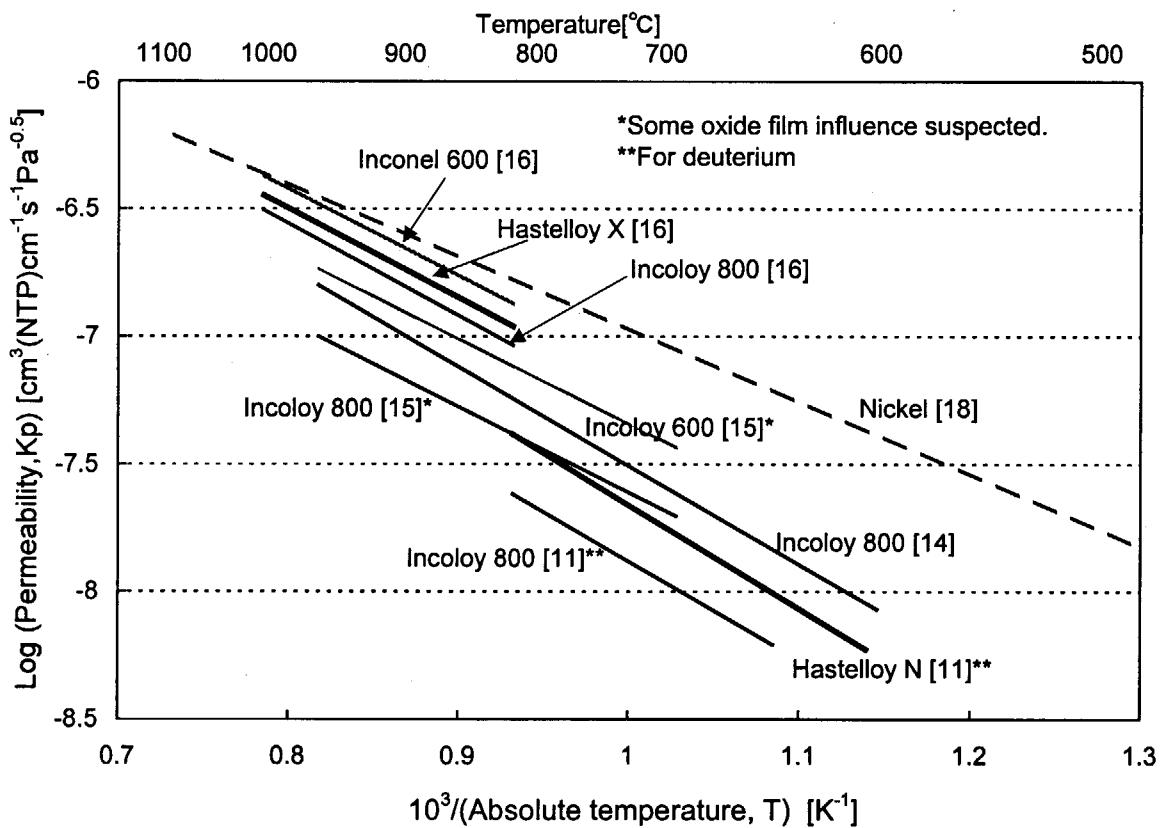


Fig.2.2 Hydrogen permeability of high-temperature alloys

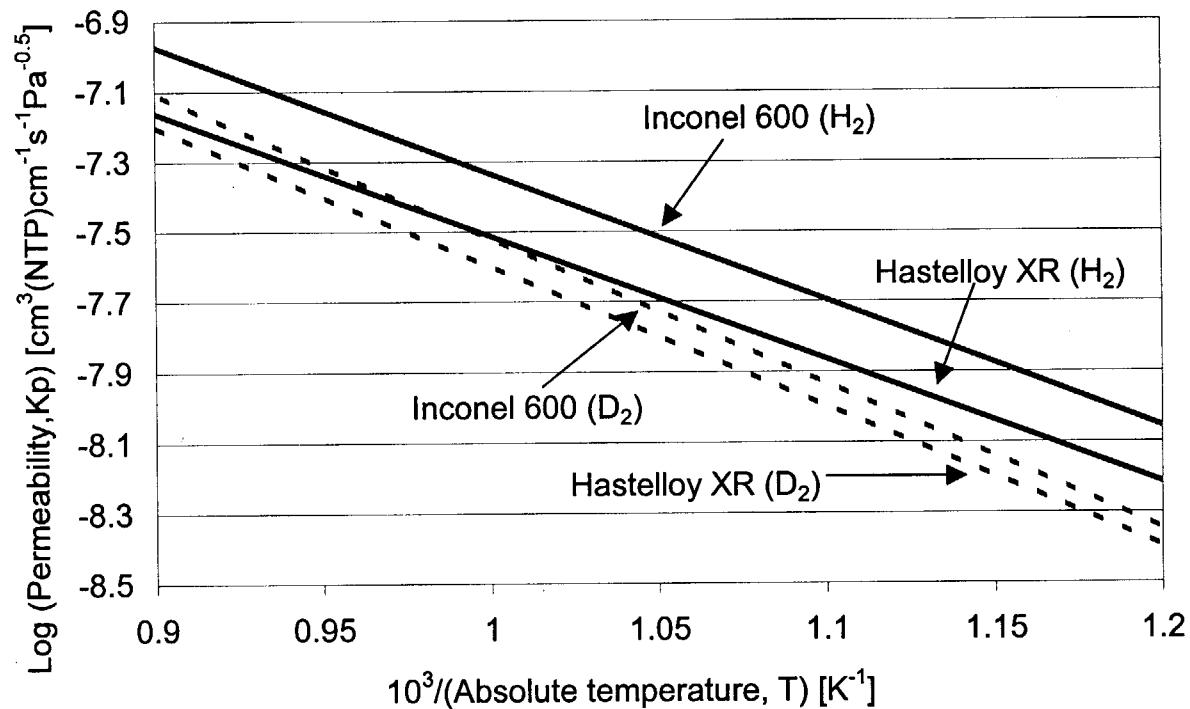


Fig.2.3 Hydrogen and deuterium permeability of Hastelloy XR and Inconel 600

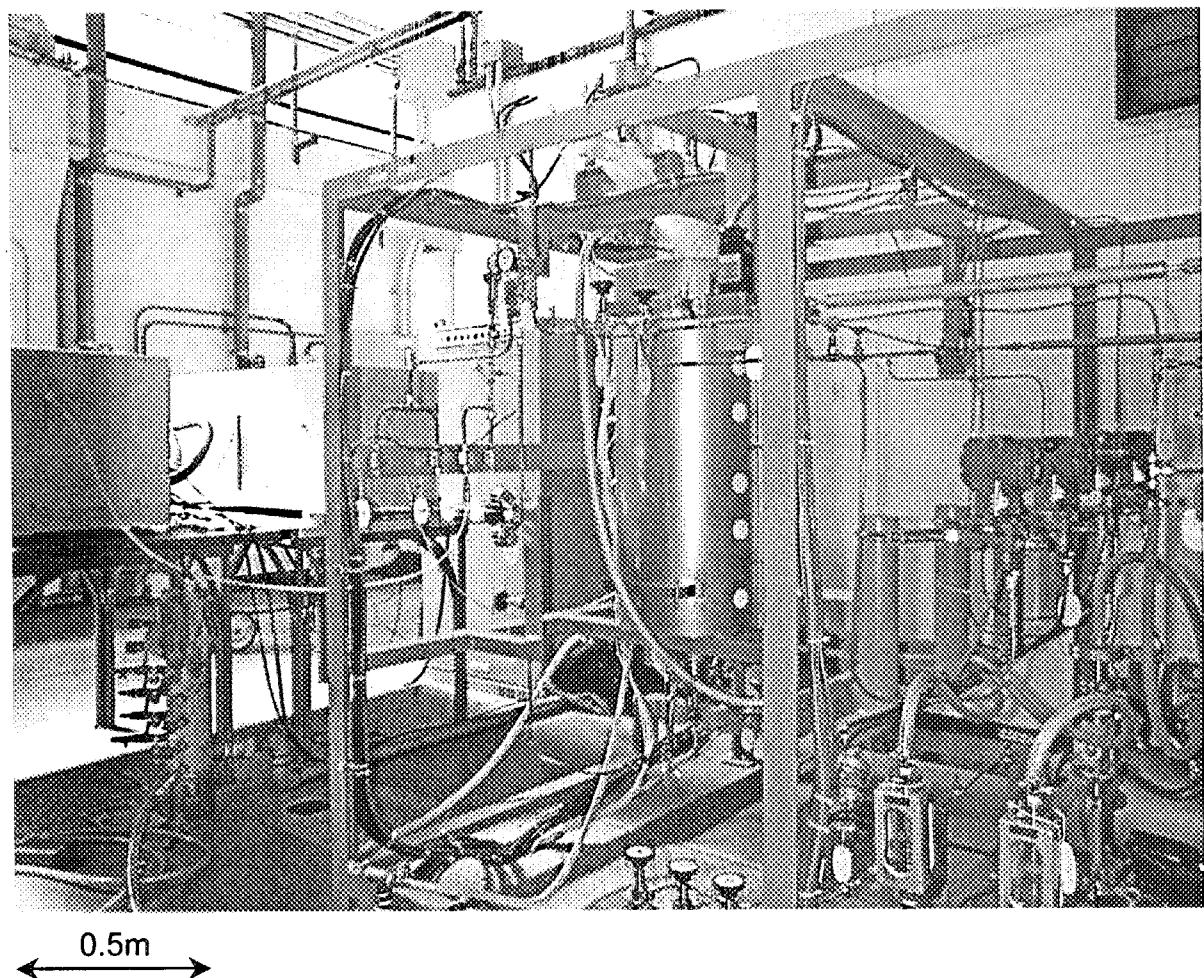


Fig.2.4 Experimental apparatus

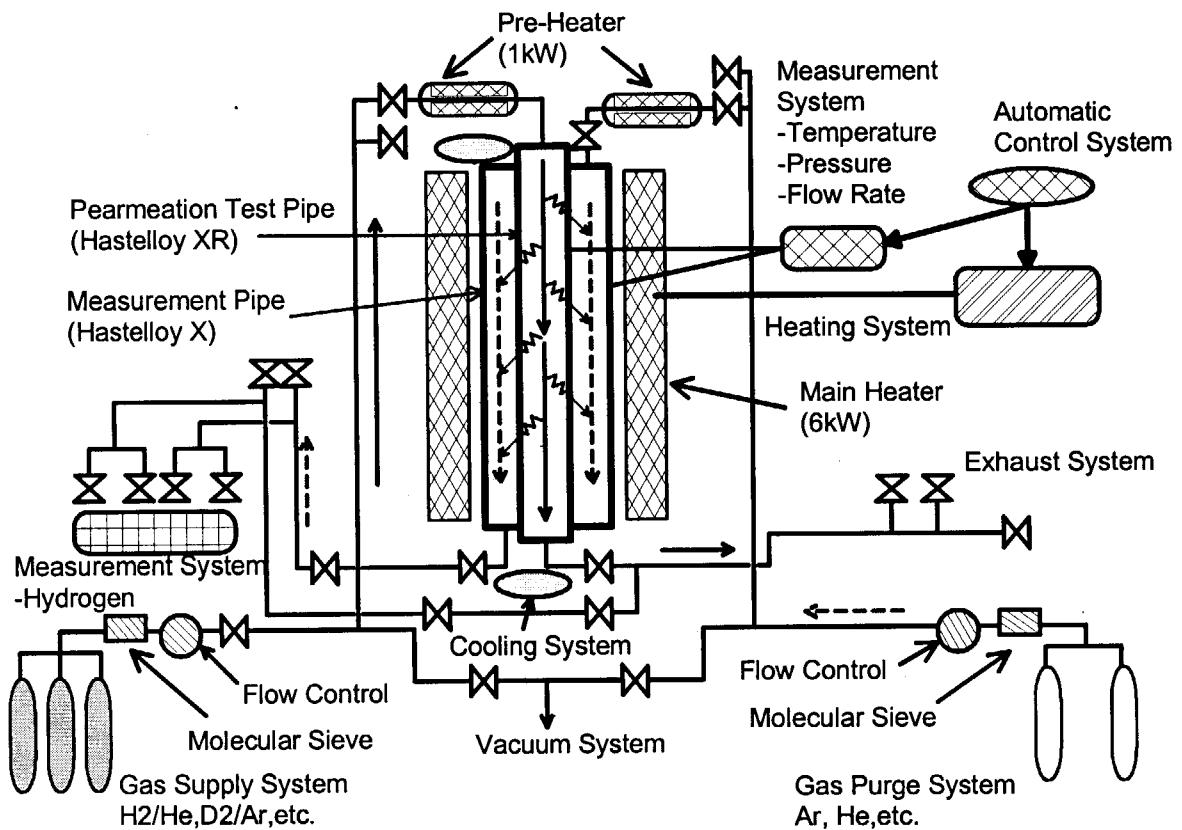


Fig.2.5 Experimental apparatus

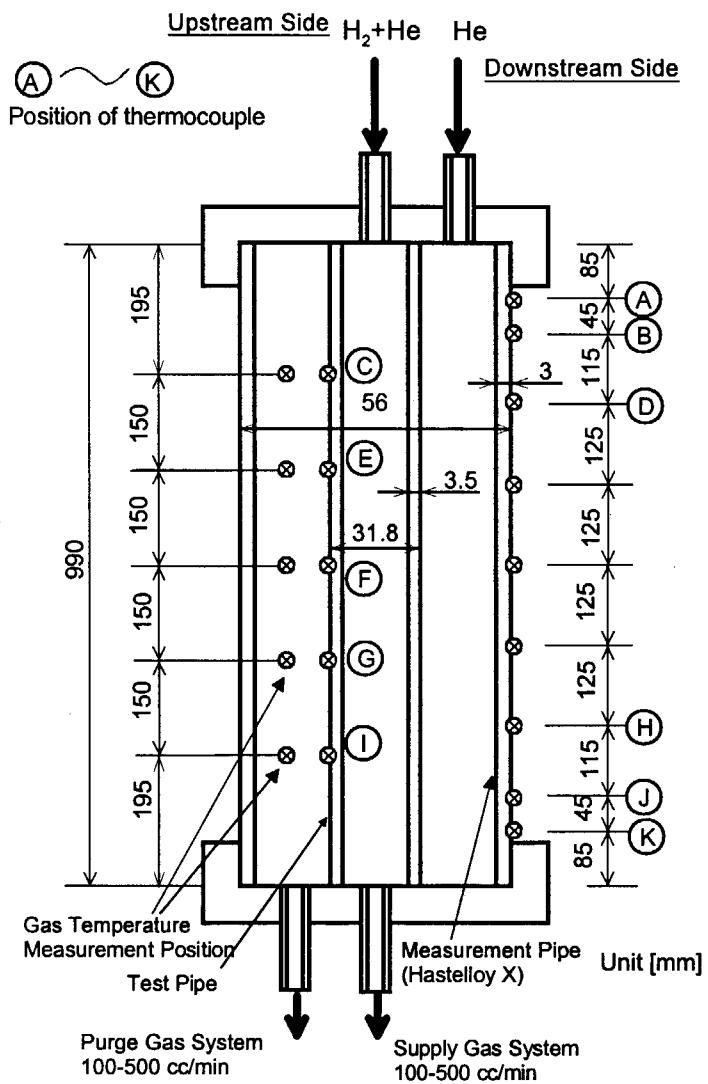


Fig.2.6 Test section of apparatus and measurement points of wall and gas temperature

3. 試験結果と考察

Table 3.1 に加熱処理によって自然形成された酸化膜が重水素の透過量に及ぼす影響を調べるために実施した試験結果を示す。表中の各項目はそれぞれ左から、試験番号、使用した試験管番号、加熱処理時間、有効加熱部の積分平均温度、積分平均温度(絶対温度)の逆数、標準ガスの重水素濃度、質量分析計から求めた環状流路部出口の重水素濃度、単位時間当たりに試験管を通して環状流路部に透過した重水素の体積流量、測定管から試験体外側に透過していく重水素量の推定値、重水素透過係数及びその常用対数値である。

重水素透過係数を求めるにあたっては、係数がアレニウス型の温度の関数となるため、各試験における透過試験管の軸方向平均温度が必要であり、これまでと同様の方法⁽¹⁹⁾により試験部温度の測定結果を用いて平均温度を算出した。

Table 3.1 中の重水素透過量は水素の場合と同様にして求めた。試験管を透過する重水素の透過流束 J [cm(NTP)·s⁻¹] は以下のように求められる⁽¹⁶⁾。気相中の重水素分圧と金属表面に溶解した重水素モル濃度との関係が以下の Sievert's 則に従うとする。

$$C_s = S \sqrt{p_{D_2}} \quad (1)$$

ここで、 C_s は重水素のモル濃度、 S [cm³(NTP)·cm⁻³·Pa^{-0.5}] は溶解度、 p_{D_2} [Pa] は気相の重水素分圧である。

円管の半径を r [cm] とすれば、透過流束は下式で近似できる。

$$J = -D_s (r/r_i) (dC_s/dr) \quad (2)$$

D_s [cm²·s⁻¹] は金属に対する重水素の拡散係数である。式(1)を式(2)に代入して積分すると下式となる。

$$J = \frac{K_p}{r_i \cdot \ln(r_o/r_i)} (\sqrt{p_i} - \sqrt{p_o}) \quad (3)$$

ここで、 p_i, p_o [Pa] はそれぞれ透過試験管内と測定管内の重水素分圧であり、 r_i, r_o [cm] は試験管の内径と外径である。本試験では、試験管内を流れる流体中の重水素分圧は一定と仮定し、測定管内重水素分圧は測定管入口でゼロ、出口では質量分析計で測定した重水素濃度から求めた分圧に等しいと仮定して、出入口での算術平均値を用いた。 K_p [cm³(NTP)·cm⁻¹·s⁻¹·Pa^{-0.5}] は下式で表される透過係数である。

$$K_p = D_s \cdot S = F_0 \exp(-E_0/RT) \quad (4)$$

ここで、 F_0 [cm³(NTP)·cm⁻¹·s⁻¹·Pa^{-0.5}] は重水素透過に対する頻度因子、 E_0 [kJ·mol⁻¹] は活性化エネルギーである。 R [J·mol⁻¹·K⁻¹] は気体定数、 T [K] は円管の絶対温度である。

以上のことから、管長 L [cm] の円管に対する重水素透過量 Q [cm³·s⁻¹] は内径を基準として次式で表される。

$$Q = 2\pi r_i l J = \frac{2\pi K_{XR}}{\ln(r_o/r_i)} (\sqrt{p_i} - \sqrt{p_o}) \quad (5)$$

ここで、 K_{XR} はハステロイXRの透過係数である。

本試験では、測定管を通して試験体外側に透過する重水素量 Q_o を求め、重水素透過量 Q を補正した。

$$Q_o = 2\pi R_i L J_o = \frac{2\pi L K_X}{\ln(R_o/R_i)} (\sqrt{p_o} - \sqrt{p_a}) \quad (6)$$

ここで、 J_o は測定管に対する透過流束、 K_X は測定管(ハステロイX)の透過係数、 p_o, p_a は測定管内外の重水素分圧である。測定管外雰囲気は大気であることから $p_a=0$ と仮定した。また、Lは測定管長さ、 R_i, R_o は測定管の内外径である。測定管の壁温度は透過試験管に等しいと仮定した。これまでの報告⁽²¹⁾によると重水素の透過係数は水素に比べて約 $1/\sqrt{2}$ 倍になるとされている。そこで、 K_X はこれまでに報告されているハステロイXの水素透過係数^(16,17)を $1/\sqrt{2}$ 倍した値を用いた。酸化膜による低減効果は酸化膜の厚さや形成状態に依存するが、 $1/100 \sim 1/1000$ ^(14,22)であると報告されている。本試験装置では測定管の外側は大気雰囲気であり、試験開始以前に約 700°C で 50 時間以上加熱されているため、既に酸化膜が形成されている。試験部では測定管外への透過量を直接測定することはできないが、測定管内に水素を流した試験結果から、式(6)で計算した値の $1/4$ 以下になることを確認している。管外への透過量を大きく見積もることは透過係数を大きく評価することになり、HTTR水素製造システムでは、水素透過に対して保守的に評価することになる。式(6)の値を $1/4$ 倍して求めた補正量は試験で得られた透過量に対して 9%であったが、経時変化に伴い酸化膜が厚くなり、低減効果が増大すると考えると補正量がこれ以上大きくなることはない。したがって、管外への透過量は式(6)の値を $1/10$ 倍することとした。また、この補正量が最大となる式(6)の値を $1/4$ 倍とした値と測定誤差を合わせた値を頻度因子に対する誤差として Table 3.1 に表示した。なお、管外への透過量が式(6)の $1/10$ 倍以下となるときは試験で得られた透過量に対して約 4%以下の補正量となった。

試験で得られた透過量 Q_e と式(6)の補正量 Q_o の和が式(5)の Q に等しいと仮定すると、 K_{XR} は

$$K_{XR} = \frac{(Q_e + Q_o) \ln(r_o/r_i)}{2\pi l (\sqrt{p_i} - \sqrt{p_o})} \quad (7)$$

となる。

以上 の方法で求めたハステロイXRの重水素透過係数を Fig.3.1 に示す。加熱処理時間が 150 時間の透過試験管でも、酸化膜による透過量の低減効果(×, *)が表れている。重水素濃度 0.1%, 透過試験管の平均温度が約 820°C の場合の透過係数について、加熱処理時間の影響を見ると、加熱処理時間が 150 時間である OD-2(×)の場合は加熱処理をしていない D-9(▲)に比べて約 35%透過量が小さくなり、1000 時間である OD-5 の場合は約 43%, 3000 時間である OD-17(△)の場合は約 80%小さくなつた。このときの透過係数は、同じ加熱処理時間に対する試験結果の中で、最も透過量が多かった値を用いることで低減効果を安全側に評価している。

試験後取り出した各透過試験管の外観写真を Fig.3.2~3.4 に示す。それぞれ加熱部が変色して酸化している様子がわかる。特に試験管中央に近づくにつれ変色の度合いが強く、酸化膜がより厚く形成

されているものと推測される。

また、本試験では日本電子製(JXA-8600MX型、波長分散型X線分光器、加速電圧15kV)の電子線マイクロアナライザー(以下、EPMAと称す)を用いて各透過試験管の酸化膜厚さを測定した。EPMAとは、試料表面の元素分析を行うための装置である。物質に電子線を照射すると、原子の軌道上の電子が弾き飛ばされ、その空いた部分に外殻軌道上の電子が落ち込み、この時のエネルギー差に応じた特性X線が発生する。特性X線のエネルギーは元素固有のものであり、この信号を検出することにより、試料表面の構成元素の定性・定量分析が可能となる。EPMAは一般に電子線の照射系、試料ステージ、X線分光器、真空排気系、コンピュータシステム系から構成され、電子銃より放出された電子線は、電子レンズにより絞られ、走査コイルによって試料の任意の位置に照射される。試料より発生した特性X線はX線分光器により検出され、コンピュータシステムにより定性分析などの解析が行えるようになっている。

Fig.3.5に透過試験管の酸化膜観察測定位置をTable 3.2に観察条件を示す。試験片は、Fig.3.5に示す測定位置において透過試験管を切断して断面埋め込みサンプルを作製し、観察面をバフ研磨により仕上げて分析サンプルとした。Fig.3.6～3.11に各透過試験管における各測定位置での光学顕微鏡によるマクロ写真を、Fig.3.12～Fig.3.14には走査型電子顕微鏡(SEM)による観察像を示す。観察像の矢印は、EPMAの分析位置を表している。マクロ写真からは酸化膜厚さを定量的に評価することができず酸化スケールは確認できなかった。また、試験管3の長手方向について酸化膜を比較すると、測定位置①においてのみ、僅かな酸化スケールが確認できた。周方向については酸化膜の形成に関する相違は確認できなかった。SEM観察像からわかるように、測定位置②については、酸化スケールがほとんど形成されておらず、測定位置①においても、厚さ10μm以下の酸化スケールしか確認できなかった。これより、SEM観察像から試験管1～3について加熱処理時間の増大による酸化膜厚さの変化を定量的に評価することが困難であることがわかる。

EPMAによる線分析では、試験片外表層から中心に向かって約45μmを分析した。分析元素は酸化物の主要構成元素であるC(炭素)、O(酸素)、Cr(クロム)、Fe(鉄)の4種類とした。各試験片の分析結果をFig.3.15～3.24に示す。図の縦軸は各元素の出力強度、横軸は分析位置を示している。本試験では酸化膜厚さを調べることが目的であるため、樹脂が取り込む炭素により酸化膜の境界を見極めることとした。すなわち、分析結果において炭素プロファイルに着目すると、0mmの位置が樹脂の位置で、炭素の強度がほぼ0になった位置が管の最表層と判断される。この位置から酸素強度の上昇領域を酸化スケールと定義してスケール厚さを読み取った結果をTable 3.3に示す。クロムについてのピークは酸素のピークと一致して、その位置で鉄はマイナスのピークを示している。これは一般的な高温酸化の挙動で、酸化皮膜はクロム酸化物を主体とするものと判断される。EPMAによる分析は面分析が一般的であるが、ここでは皮膜厚さを知るのが目的であり、線分析が最適と判断した。

一般に金属の酸化速度はWagnerの放物線則に従い、ハステロイXRのヘリウムガス中の酸化速度は式(8)で表されるような関係で酸化膜が形成するとされている⁽²³⁾。

$$X_{He} = 0.082\sqrt{t} \quad (8)$$

ここで、 X_{He} は酸化膜厚さ(μm)、 t は酸化時間(h)である。

本試験では、加熱処理時間に対する酸化膜厚さを時間の関数として求めることができなかつた。これ

は、純度管理されたヘリウムガス雰囲気では、3000 時間程度の加熱処理を実施しても有意な酸化膜形成の違いが見られず、さらに、二重管試験部の両端では温度低下が生じる構造であること等から一様な厚さの酸化膜を形成させることができ難かったことが原因ではないかと考えている。また、酸化膜厚さが一様でないことが同じ加熱処理時間であっても重水素透過量に差が生じた原因の一つであると思われる。したがって、ヘリウムガス雰囲気で 3000 時間加熱後に自然形成された酸化膜を有するハステロイXR管の水素同位体透過係数に対しては保守的に評価することを考慮して、80%低減率に相当する約 1/5 の透過低減効果を有すると考えることができる。これらのことから、HTTRや将来の実用高温ガス炉の中間熱交換器(IHX)伝熱管表面では、本試験で形成させた酸化膜よりも十分厚い酸化膜が形成されると予想されることから、少なくとも 1/5 以下(80%以上の低減率)の透過低減効果が期待できる。

Table 3.1 Experimental results of deuterium permeation

No.	Test Pipe No.	Heating Time [h]	Ave. Temp. [°C]	1/Abs.T. [1000/K]	D ₂ supply Conc. [ppm]	D ₂ meas. Conc. [ppm/s]	Amount of Permeated [cm ³ /s]	Correc. of D ₂ Q ₀ [cm ³ /s]	Permeability cm ³ (STP) cm·s·Pa ^{0.5}	Log (Permea.) [log(K _p)]
D-1	-	-	818.84	0.916	4.04×10 ⁴	6.361	5.43×10 ⁻³	1.51×10 ⁻⁴	5.19×10 ⁻⁸	-7.284
D-2	-	-	768.51	0.960	4.04×10 ⁴	4.614	3.95×10 ⁻³	9.51×10 ⁻⁵	3.70×10 ⁻⁸	-7.432
D-3	-	-	717.88	1.009	4.04×10 ⁴	2.820	2.43×10 ⁻³	5.32×10 ⁻⁵	2.22×10 ⁻⁸	-7.654
D-4	-	-	667.26	1.063	4.04×10 ⁴	1.528	1.32×10 ⁻³	2.69×10 ⁻⁵	1.18×10 ⁻⁸	-7.928
D-5	-	-	819.05	0.916	9.89×10 ³	3.062	2.58×10 ⁻³	1.03×10 ⁻⁴	5.32×10 ⁻⁸	-7.274
D-6	-	-	768.32	0.960	9.89×10 ³	2.057	1.74×10 ⁻³	6.22×10 ⁻⁵	3.47×10 ⁻⁸	-7.460
D-7	-	-	717.73	1.009	9.89×10 ³	1.368	1.18×10 ⁻³	3.70×10 ⁻⁵	2.25×10 ⁻⁸	-7.647
D-8	-	-	667.49	1.063	9.89×10 ³	0.809	6.94×10 ⁻⁴	1.94×10 ⁻⁵	1.30×10 ⁻⁸	-7.886
D-9	-	-	818.98	0.916	9.76×10 ²	0.739	6.29×10 ⁻⁴	5.14×10 ⁻⁵	4.63×10 ⁻⁸	-7.334
D-10	-	-	769.37	0.959	9.76×10 ²	0.217	1.85×10 ⁻⁴	2.91×10 ⁻⁵	1.38×10 ⁻⁸	-7.861
D-11	-	-	719.62	1.007	9.76×10 ²	0.091	7.76×10 ⁻⁵	1.51×10 ⁻⁵	5.67×10 ⁻⁹	-8.247
D-12	-	-	669.56	1.061	9.76×10 ²	0.045	3.86×10 ⁻⁵	7.34×10 ⁻⁶	2.70×10 ⁻⁹	-8.568
OD-1	TP-1	150	818.25	0.916	1.01×10 ⁴	2.404	2.05×10 ⁻³	9.36×10 ⁻⁵	4.09×10 ⁻⁸	-7.389
OD-2	TP-1	150	818.17	0.916	9.91×10 ²	0.479	4.09×10 ⁻⁴	4.18×10 ⁻⁵	2.89×10 ⁻⁸	-7.539
OD-3	TP-1	150	819.37	0.915	9.91×10 ²	0.465	3.97×10 ⁻⁴	4.12×10 ⁻⁵	2.80×10 ⁻⁸	-7.552
OD-4	TP-2	1000	818.22	0.916	1.01×10 ⁴	2.532	2.16×10 ⁻³	9.61×10 ⁻⁵	4.31×10 ⁻⁸	-7.365
OD-5	TP-2	1000	819.87	0.915	9.91×10 ²	0.421	3.59×10 ⁻⁴	3.92×10 ⁻⁵	2.53×10 ⁻⁸	-7.597
OD-6	TP-3	3000	818.15	0.916	3.93×10 ⁴	5.157	4.40×10 ⁻³	1.37×10 ⁻⁴	4.25×10 ⁻⁸	-7.372
OD-7	TP-3	3000	768.97	0.960	3.93×10 ⁴	3.905	3.33×10 ⁻³	8.78×10 ⁻⁵	3.16×10 ⁻⁸	-7.500
OD-8	TP-3	3000	718.52	1.008	3.93×10 ⁴	2.275	1.94×10 ⁻³	4.78×10 ⁻⁵	1.81×10 ⁻⁸	-7.743
OD-9	TP-3	3000	669.03	1.061	3.93×10 ⁴	1.440	1.23×10 ⁻³	2.62×10 ⁻⁵	1.13×10 ⁻⁸	-7.948
OD-10	TP-3	3000	819.49	0.915	9.90×10 ³	1.456	1.24×10 ⁻³	7.29×10 ⁻⁵	2.47×10 ⁻⁸	-7.608
OD-11	TP-3	3000	818.64	0.916	9.90×10 ³	1.795	1.53×10 ⁻³	8.09×10 ⁻⁵	3.06×10 ⁻⁸	-7.515
OD-12	TP-3	3000	818.77	0.916	9.90×10 ³	1.855	1.58×10 ⁻³	8.23×10 ⁻⁵	3.16×10 ⁻⁸	-7.500
OD-13	TP-3	3000	819.13	0.916	9.90×10 ³	1.854	1.58×10 ⁻³	8.23×10 ⁻⁵	3.16×10 ⁻⁸	-7.500
OD-14	TP-3	3000	768.65	0.960	9.90×10 ³	1.497	1.28×10 ⁻³	5.44×10 ⁻⁵	2.50×10 ⁻⁸	-7.602
OD-15	TP-3	3000	718.99	1.008	9.90×10 ³	1.150	9.81×10 ⁻⁴	3.40×10 ⁻⁵	1.88×10 ⁻⁸	-7.725
OD-16	TP-3	3000	668.15	1.062	9.90×10 ³	0.759	6.48×10 ⁻⁴	1.90×10 ⁻⁵	1.22×10 ⁻⁸	-7.915
OD-17	TP-3	3000	818.65	0.916	1.01×10 ³	0.152	1.30×10 ⁻⁴	2.35×10 ⁻⁵	8.99×10 ⁻⁹	-8.046
OD-18	TP-3	3000	819.42	0.915	1.01×10 ³	0.077	6.57×10 ⁻⁵	1.68×10 ⁻⁵	4.71×10 ⁻⁹	-8.327
OD-19	TP-3	3000	819.12	0.916	1.01×10 ³	0.106	9.06×10 ⁻⁵	1.97×10 ⁻⁵	6.38×10 ⁻⁹	-8.196
OD-20	TP-3	3000	818.09	0.916	1.01×10 ³	0.054	4.63×10 ⁻⁵	1.41×10 ⁻⁵	3.41×10 ⁻⁹	-8.467

Table 3.2 Measurement point of oxidized film

Test Pipe No.	Heating Time [h]	Meas. Point	Meas. Direc. (Deg.)	Macro Photo.	SEM	EPMA
1	150	①	0	○	○	○
			90	○	-	-
			180	○	-	-
			270	○	-	-
		②	0	-	○	○×2
			90	-	-	-
			180	-	-	-
			270	-	-	-
2	1000	①	0	○	○	○
			90	○	-	-
			180	○	-	-
			270	○	-	-
		②	0	-	○	○×2
			90	-	-	-
			180	-	-	-
			270	-	-	-
3	3000	◎	0	○	-	-
			90	○	-	-
			180	○	-	-
			270	○	-	-
		①	0	○	○	○×2
			90	○	-	-
			180	○	-	-
			270	○	-	-
		②	0	○	○	○×2
			90	○	-	-
			180	○	-	-
			270	○	-	-
		③	0	○	-	-
			90	○	-	-
			180	○	-	-
			270	○	-	-

Table 3.3 Measured thickness of oxidized film

Test Pipe No.	Meas. Position	Thickness [μm]	
		1st	2nd
1	①	7	
	②	-	7
2	①	3.3	
	②	-	-
3	①	7.6	6.3
	②	5.6	-

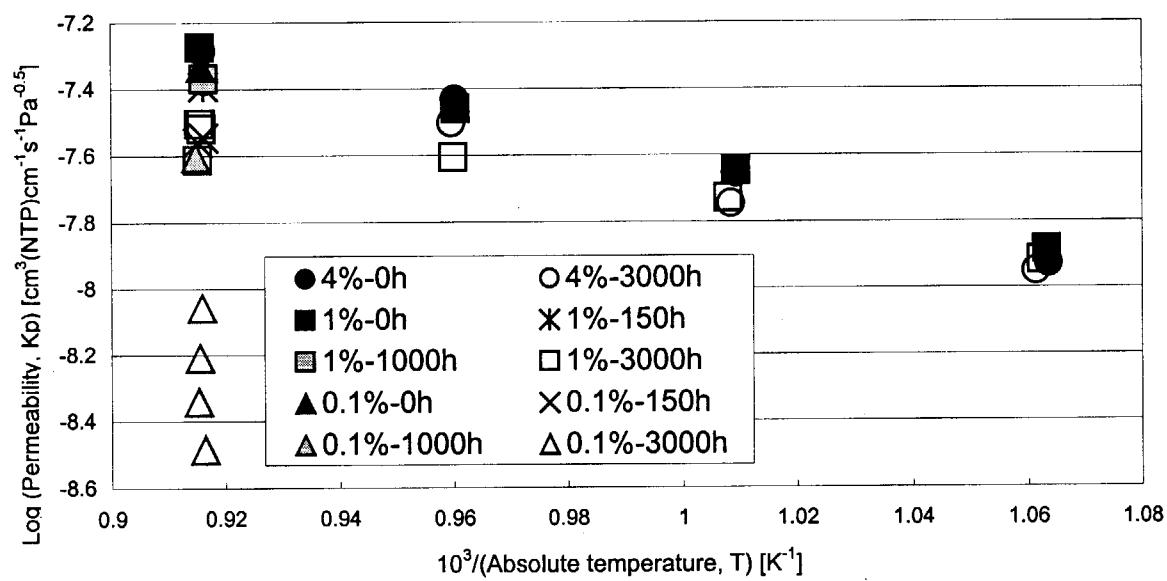


Fig.3.1 Deuterium permeability of Hastelloy XR

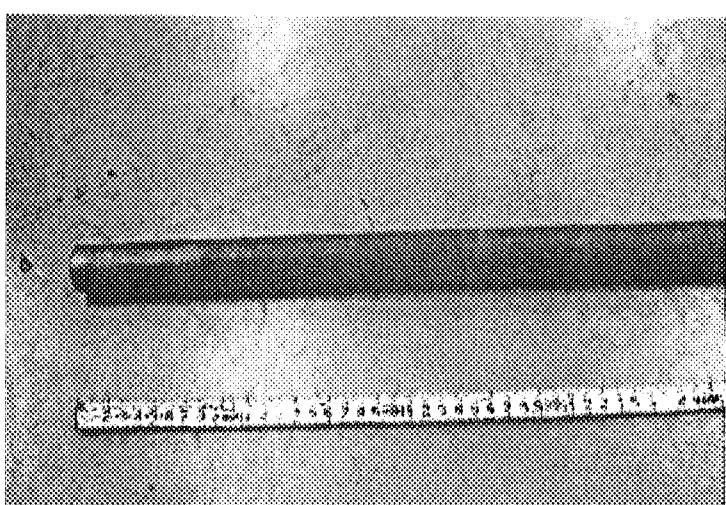
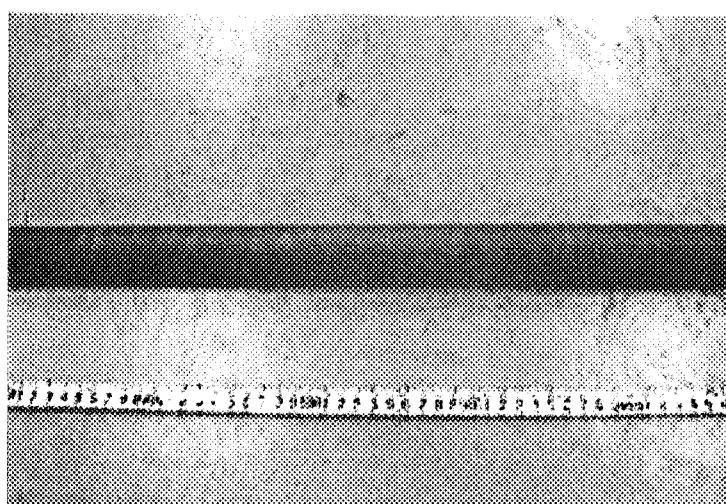
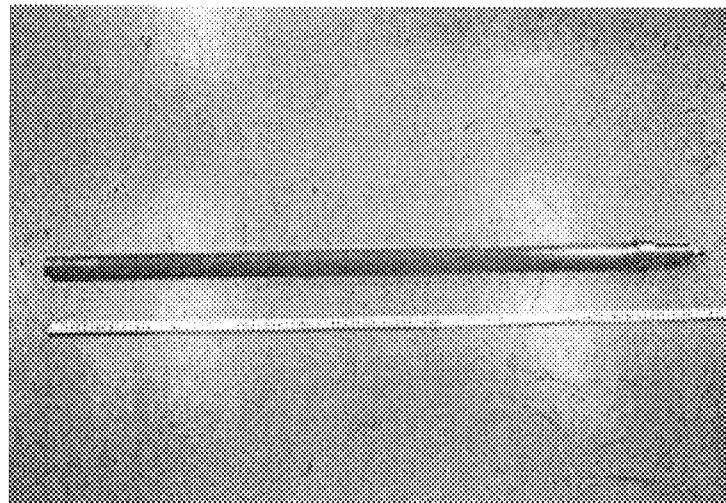


Fig.3.2 Photograph of Hastelloy XR pipe (No.1-150h)

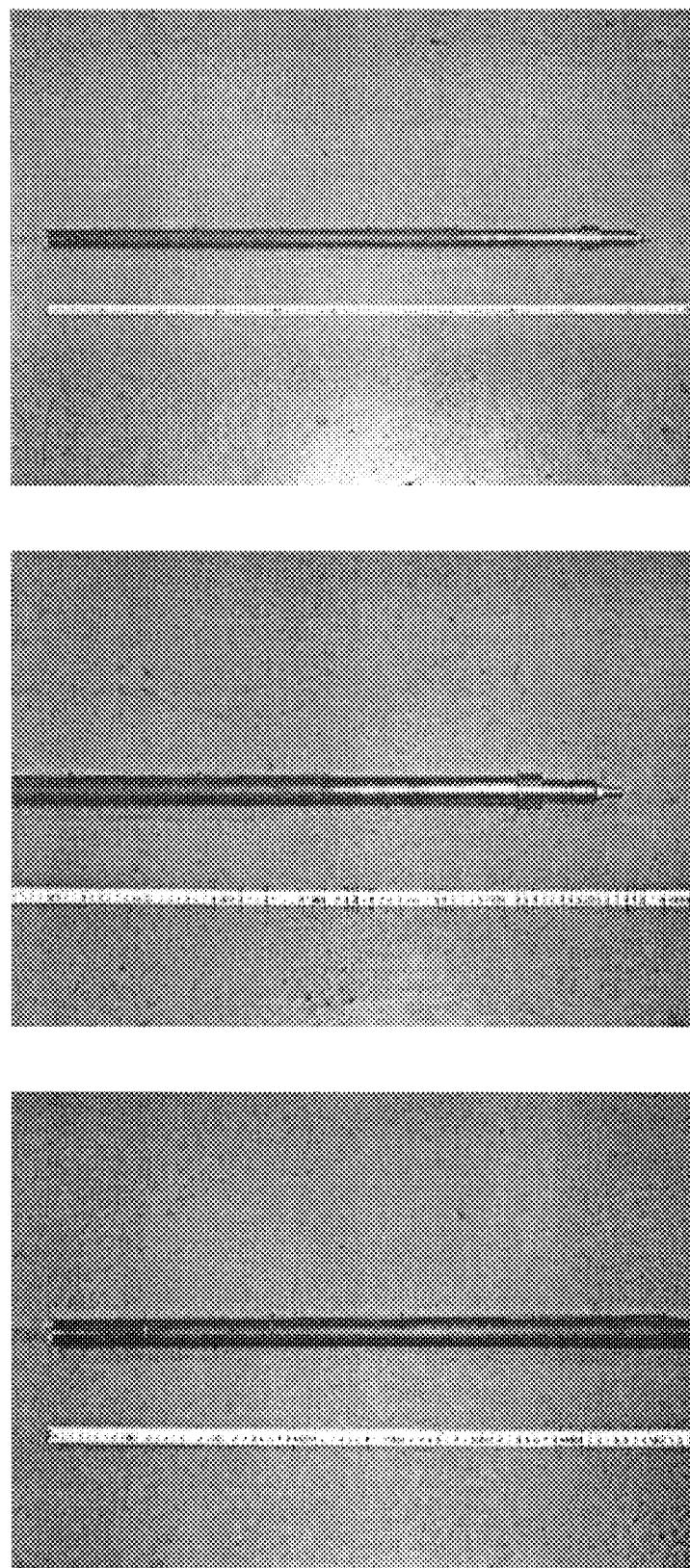


Fig.3.3 Photograph of Hastelloy XR pipe (No.2-1000h)

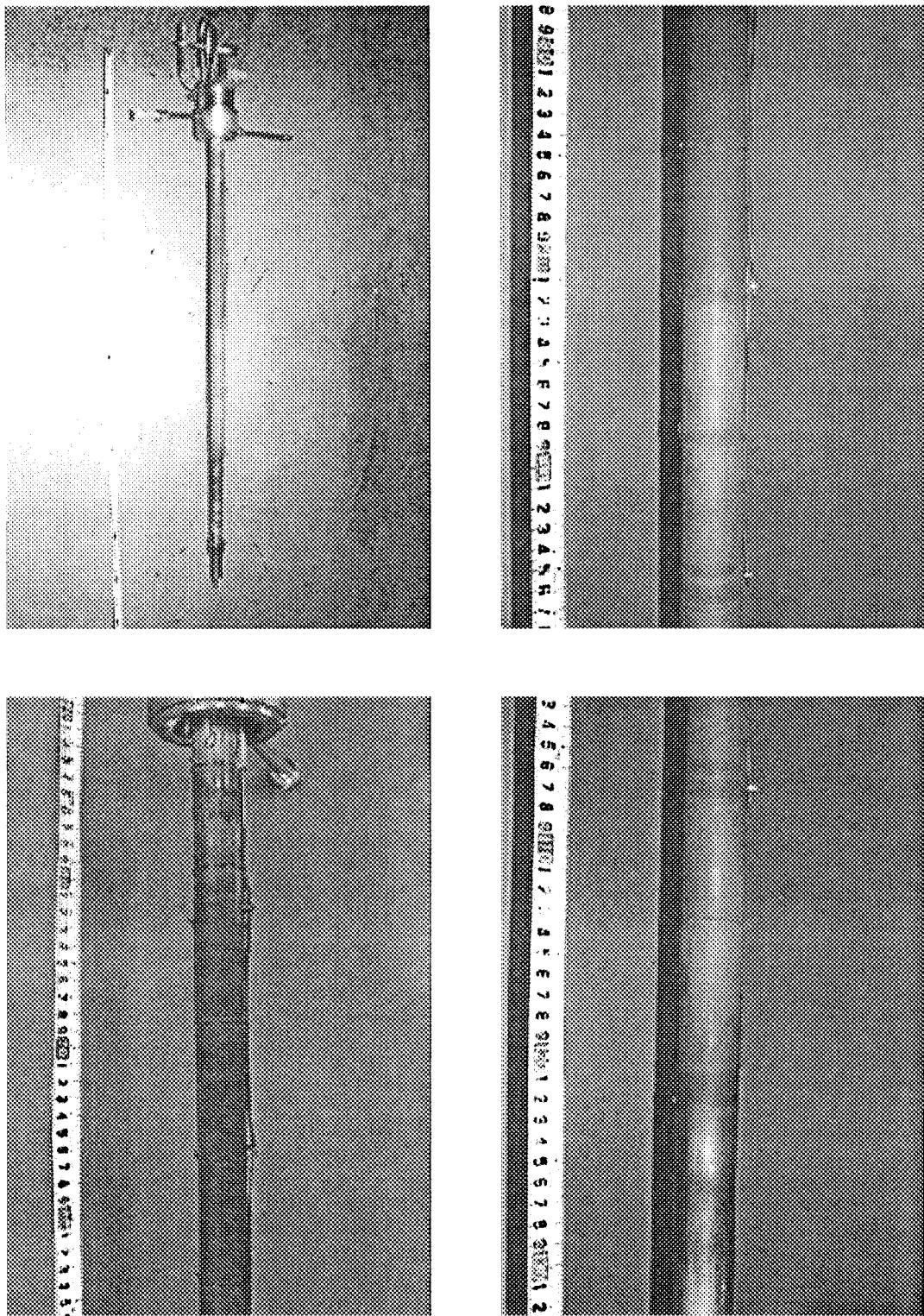


Fig.3.4 Photograph of Hastelloy XR pipe (No.3-3000h)

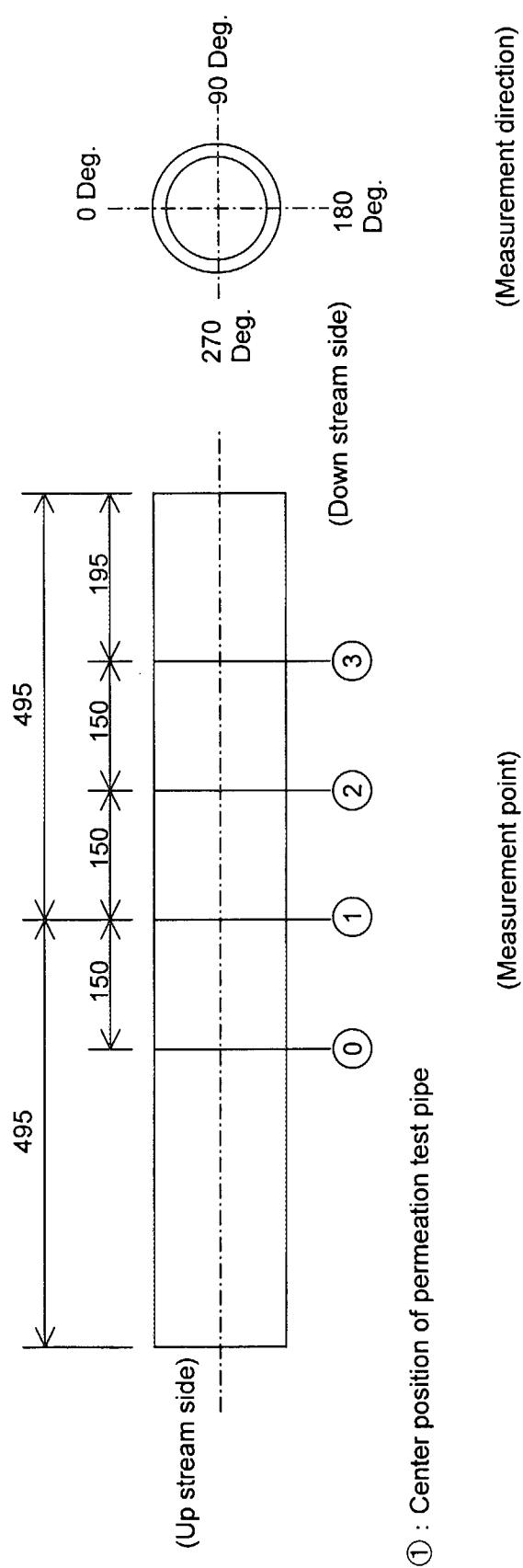


Fig.3.5 Measurement point of permeation test pipe

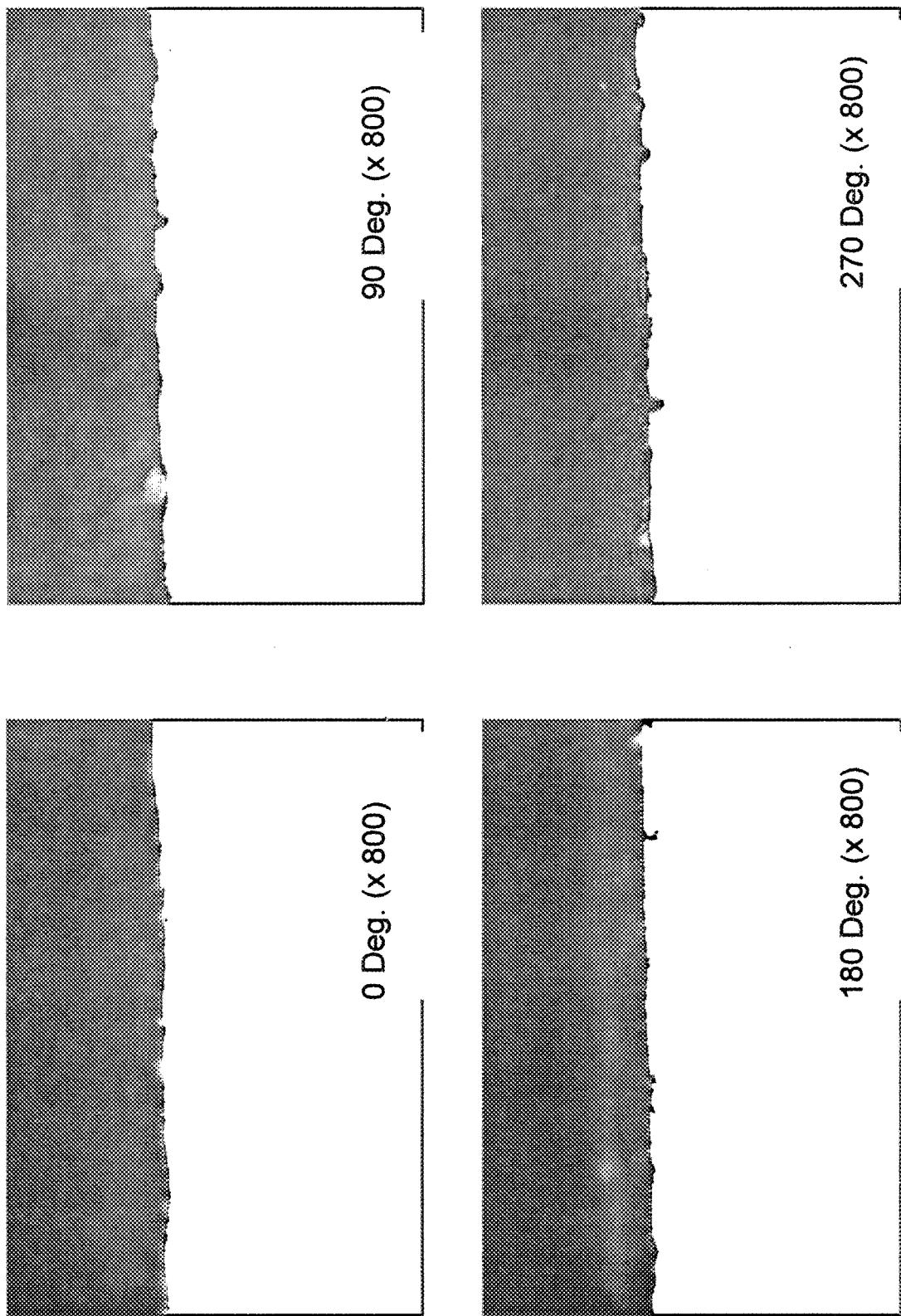


Fig.3.6 Photograph (No.1 - ①)

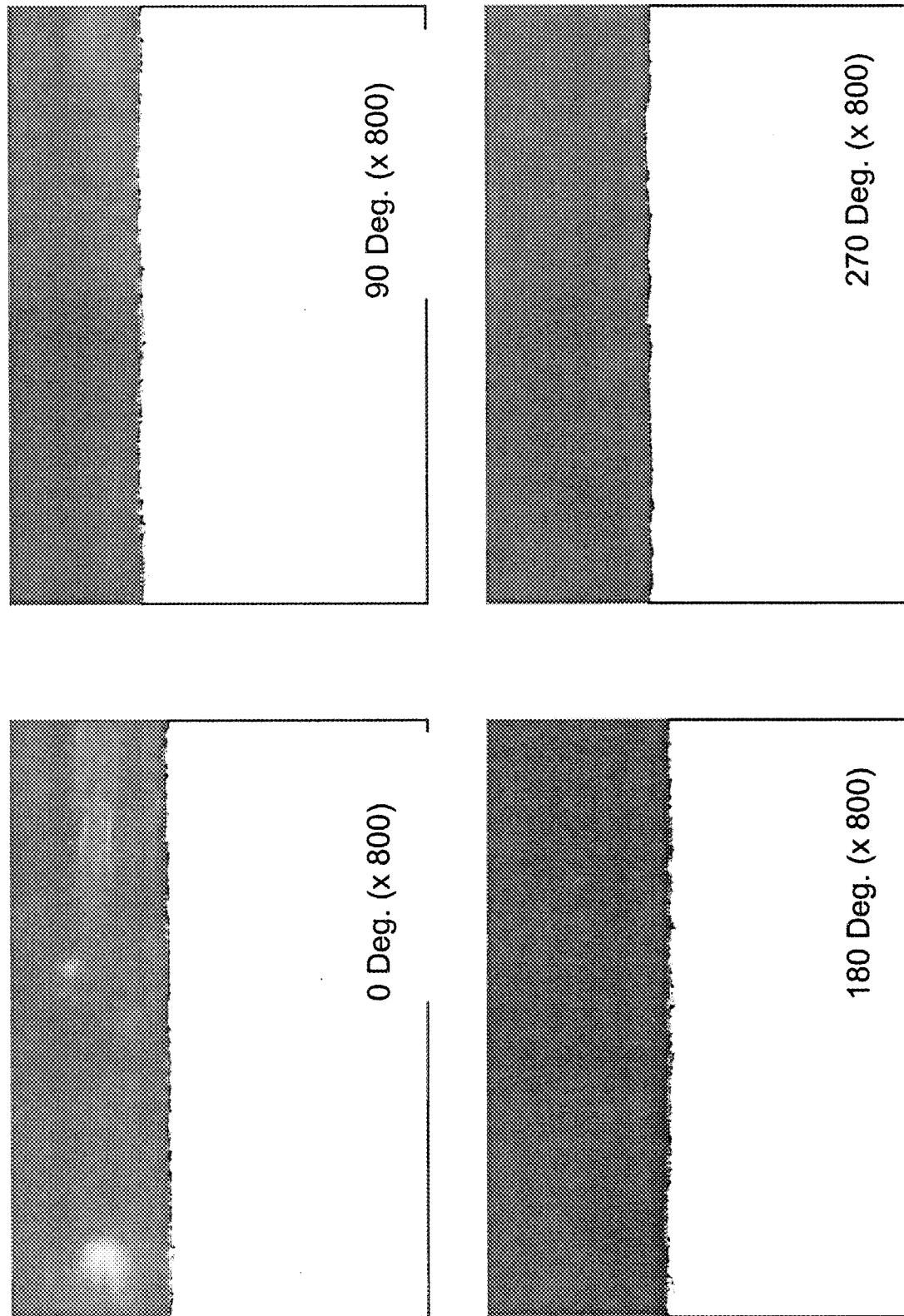


Fig.3.7 Photograph (No.2 - ①)

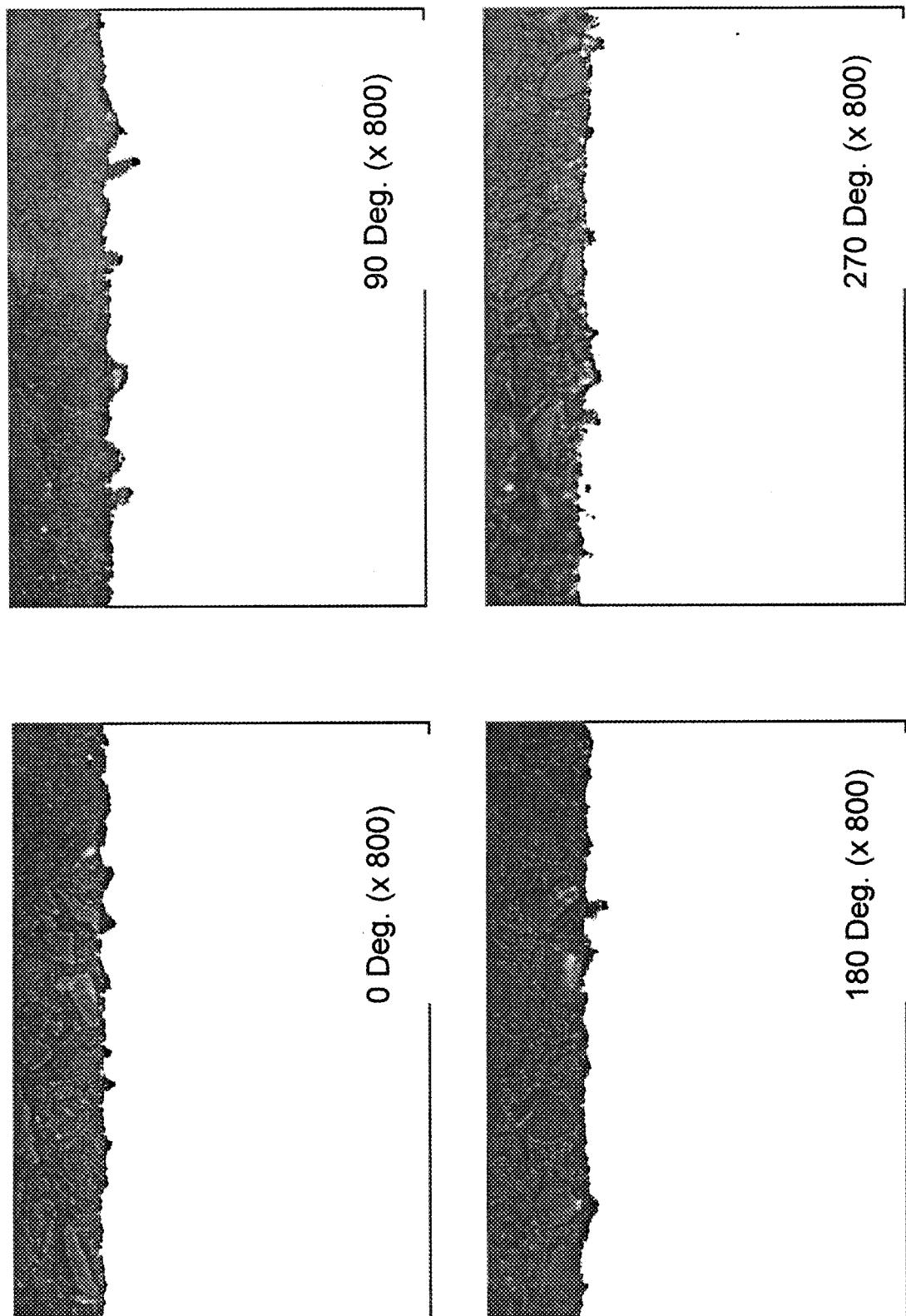


Fig.3.8 Photograph (No.3-0)

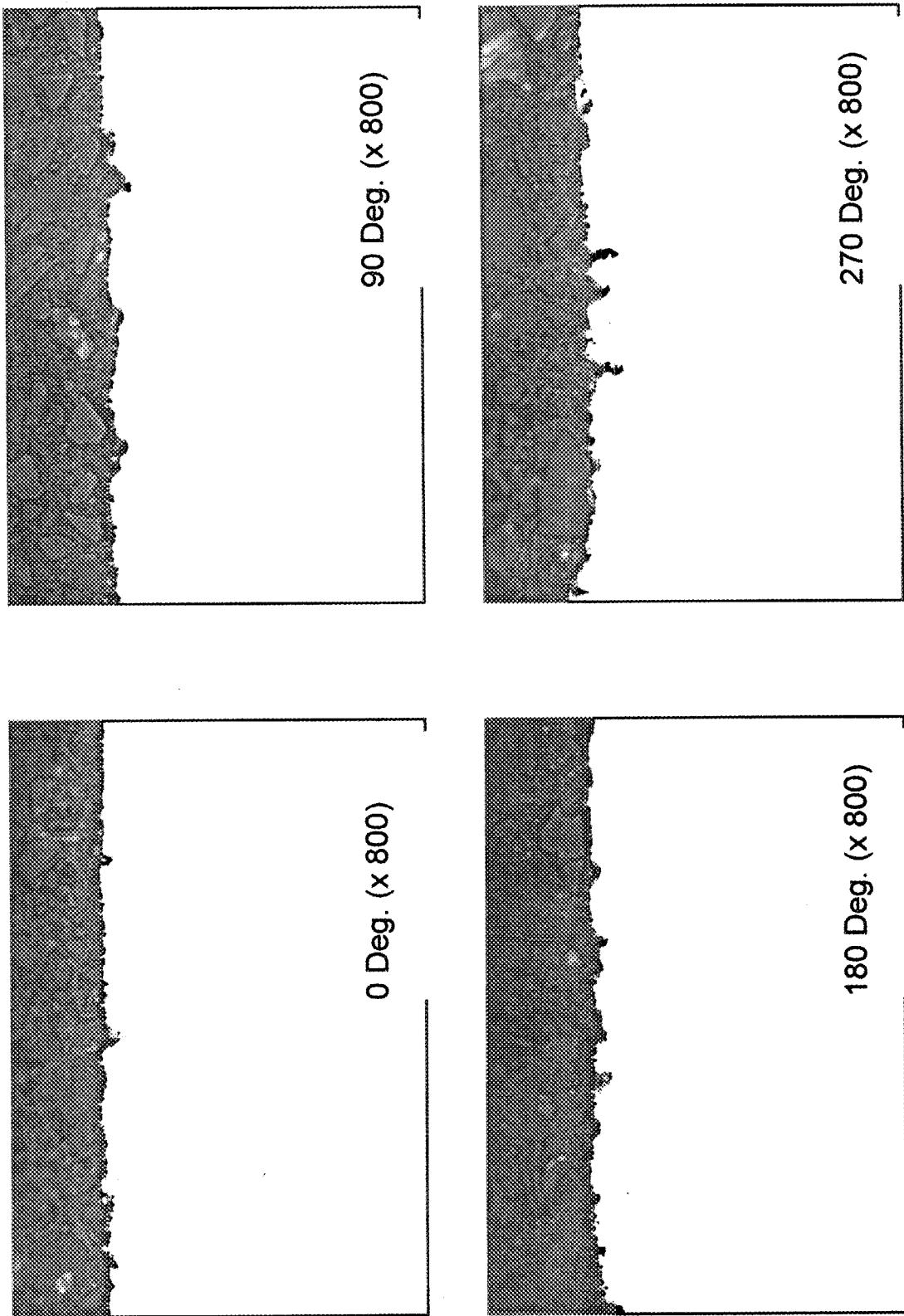


Fig.3.9 Photograph (No.3 - ①)

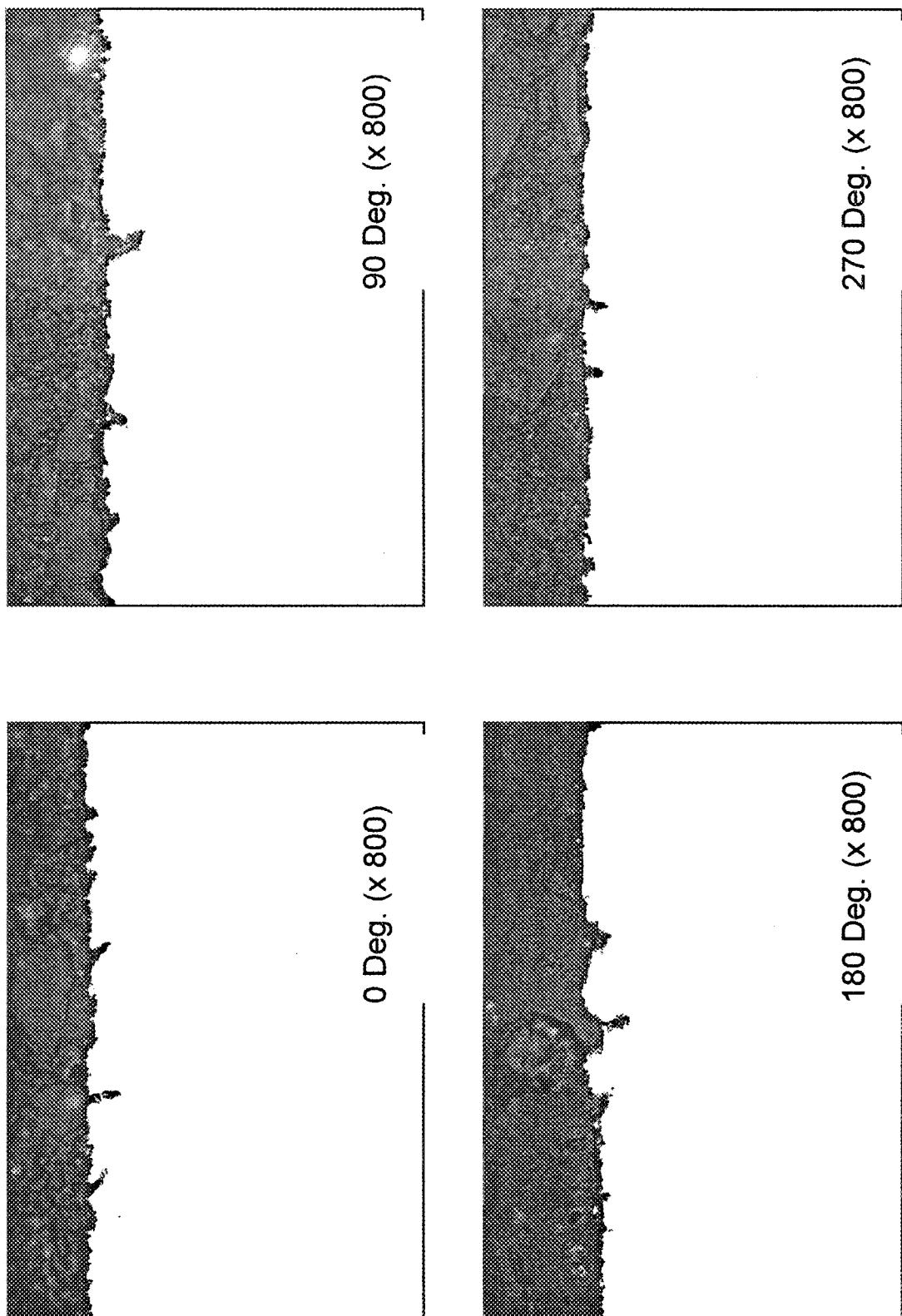


Fig.3.10 Photograph (No.3 - ②)

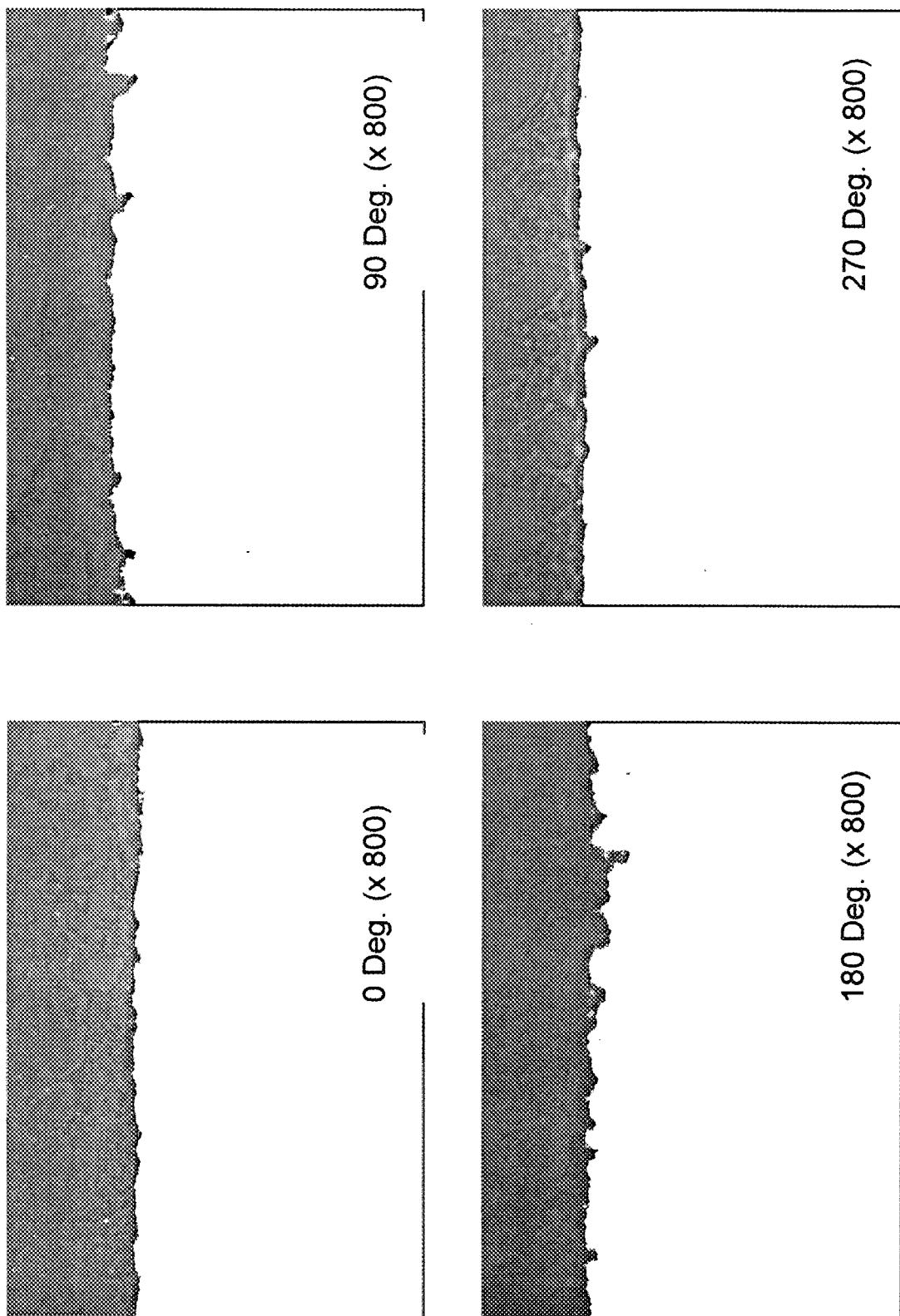
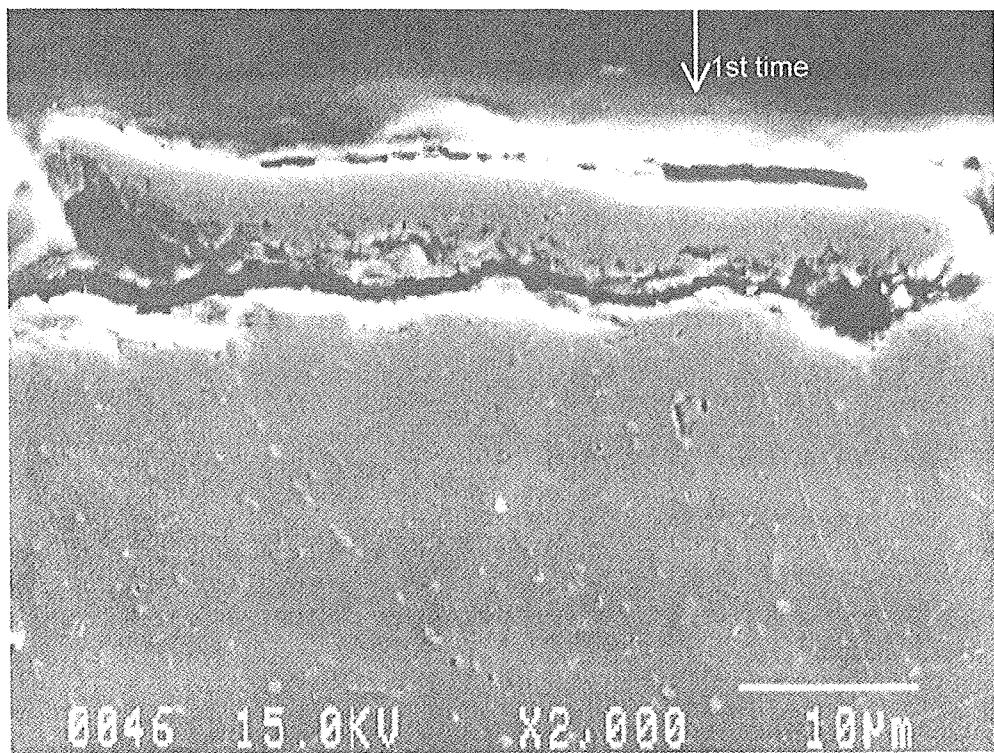
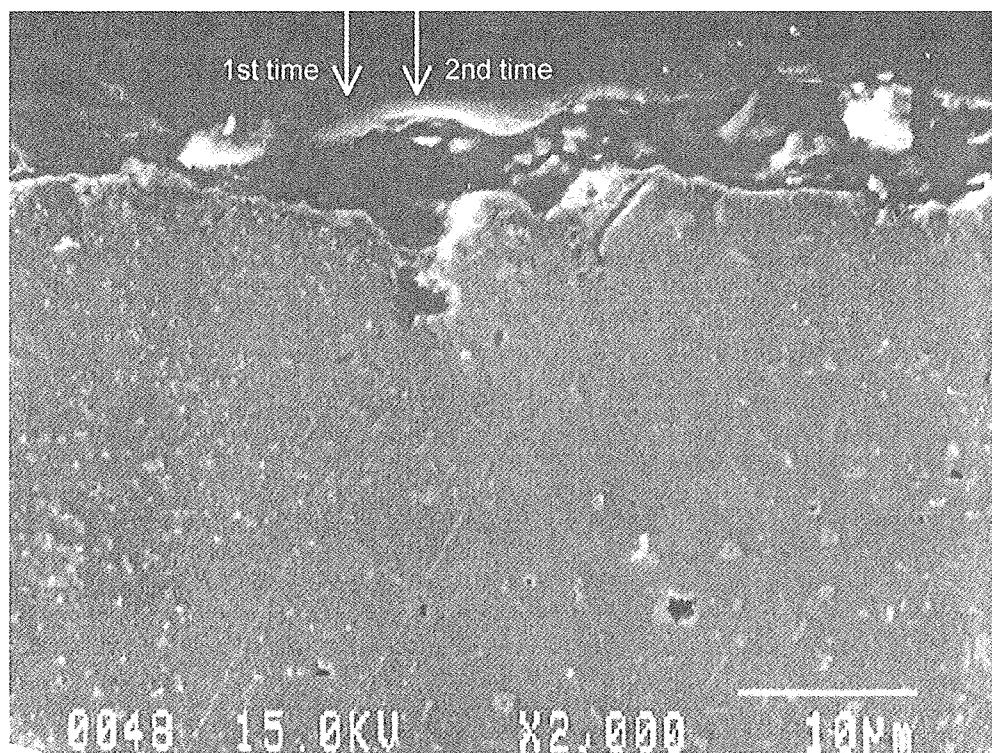


Fig.3.11 Photograph (No.3 - ③)

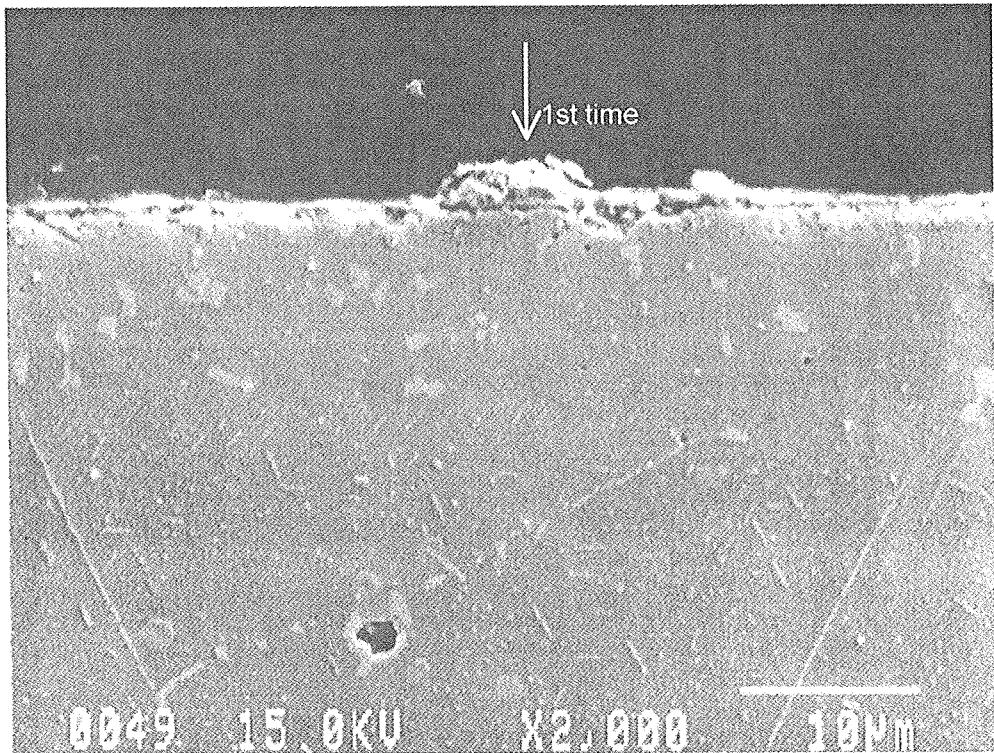


Measurement position - ①

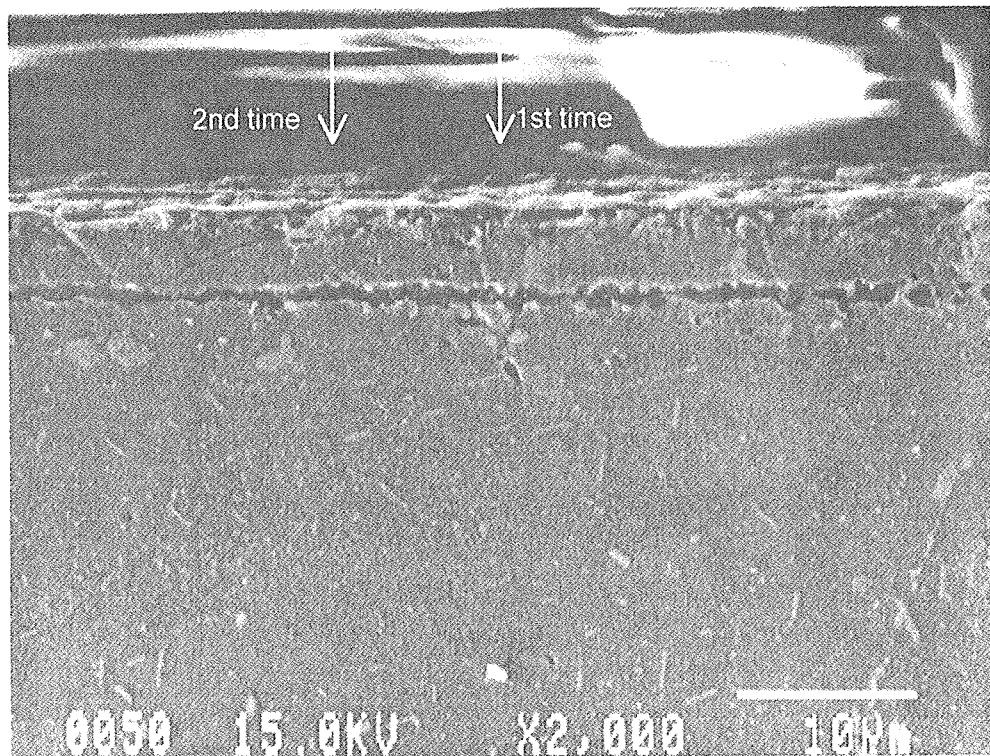


Measurement position - ②

Fig.3.12 Photograph (SEM) of permeation test pipe (No.1-150h)

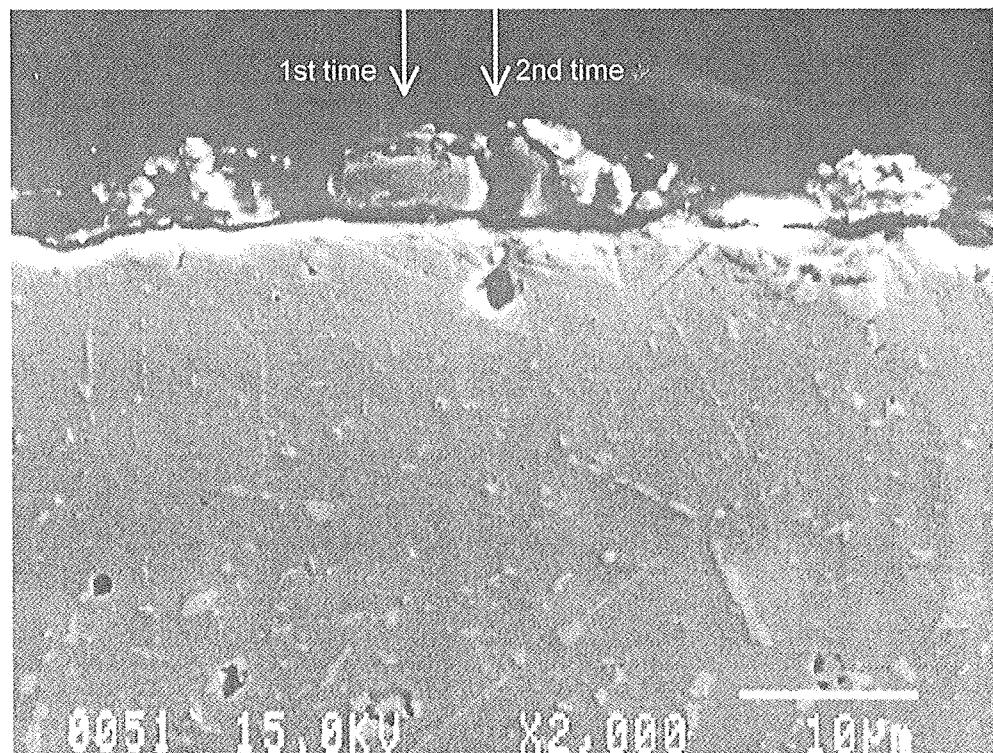


Measurement position - ①

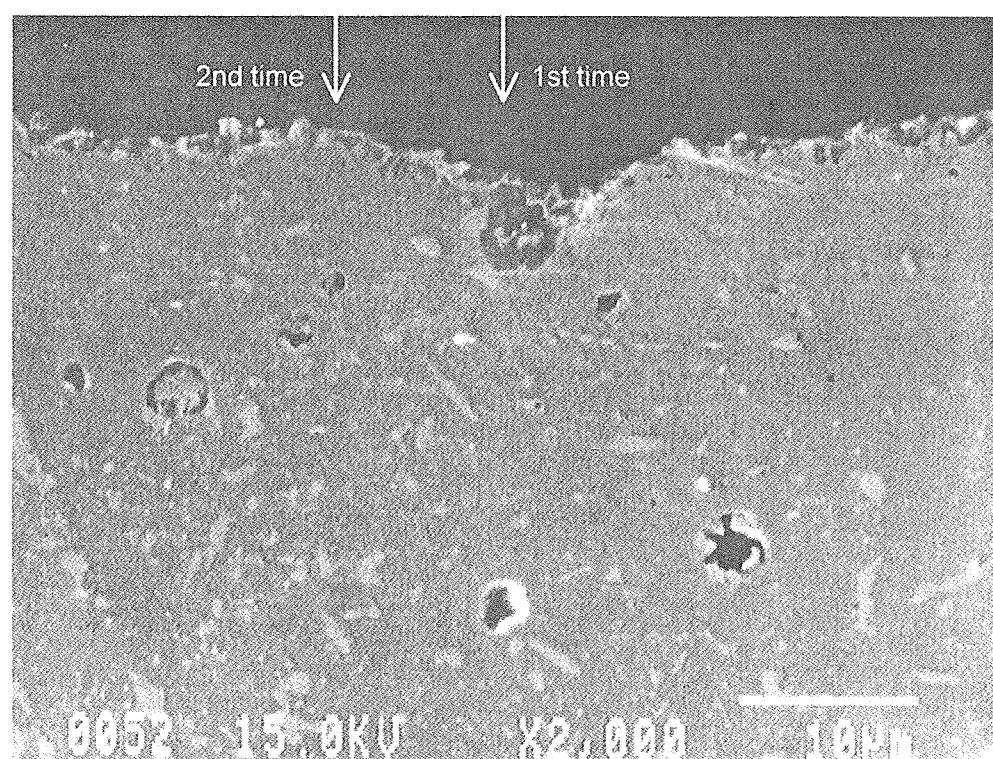


Measurement position - ②

Fig.3.13 Photograph (SEM) of permeation test pipe (No.2-1000h)



Measurement position - ①



Measurement position - ②

Fig.3.14 Photograph (SEM) of permeation test pipe (No.3-3000h)

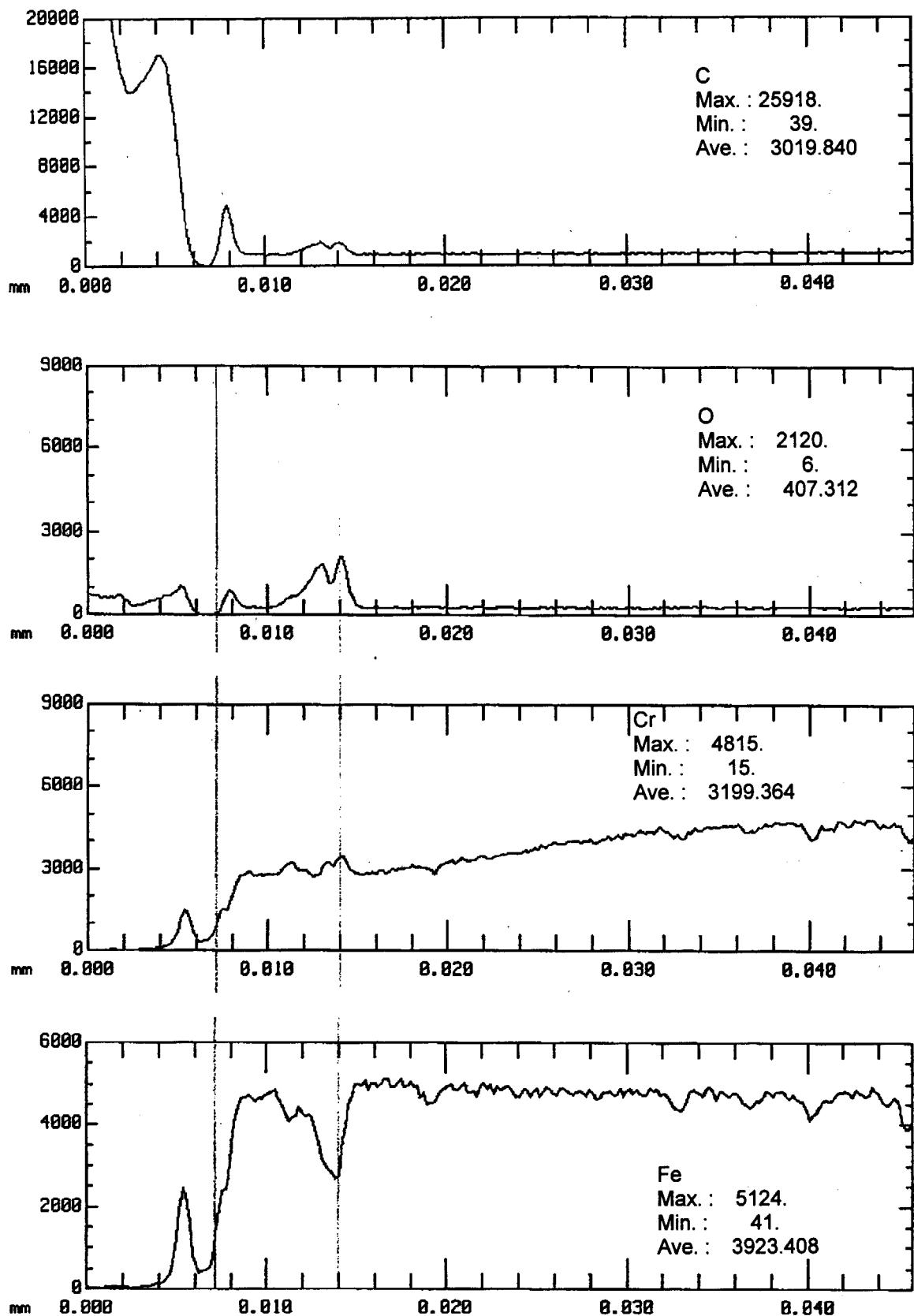


Fig.3.15 Results of EPMA (No.1 - ①)

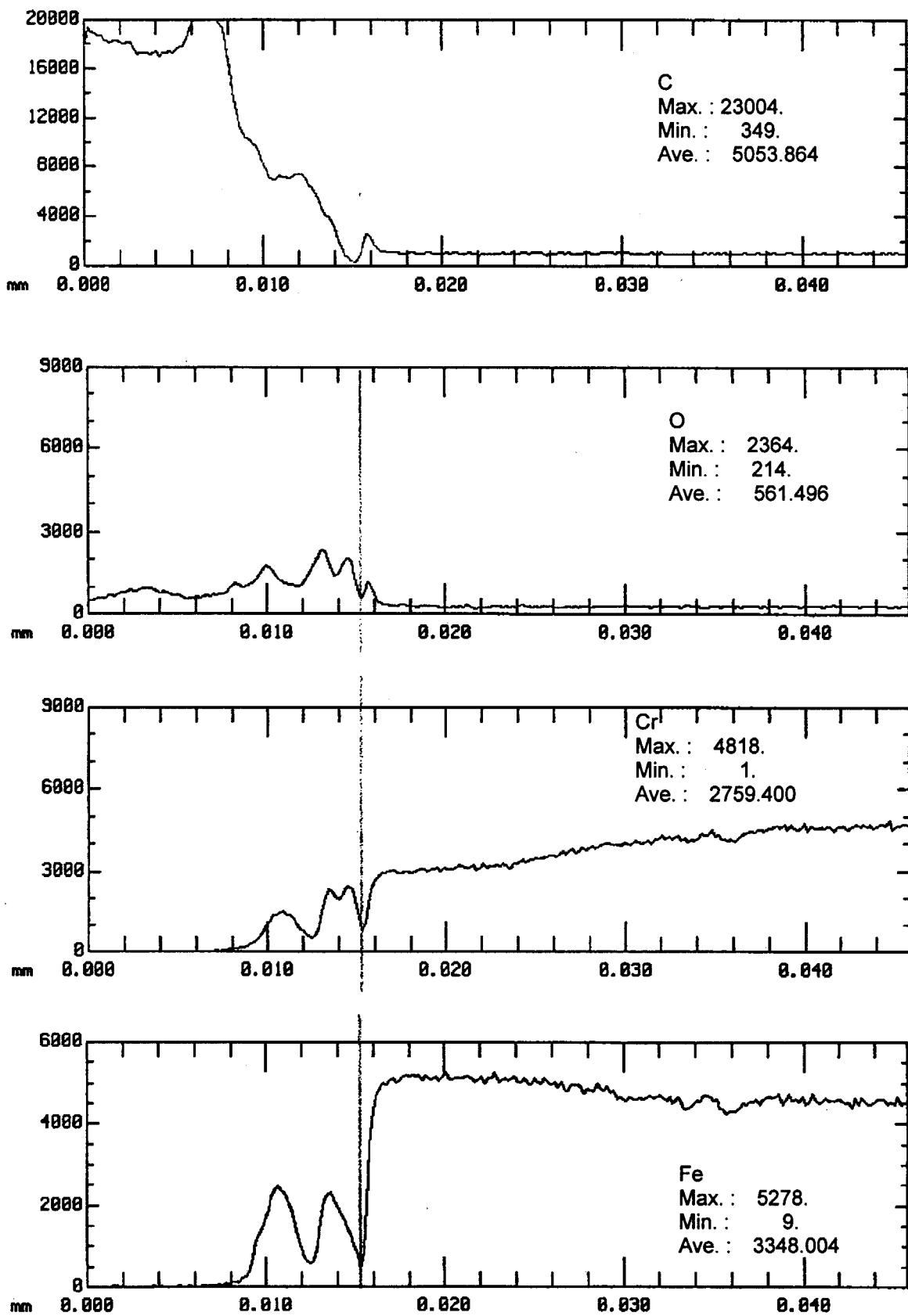


Fig.3.16 Results of EPMA (No.1 - ②)

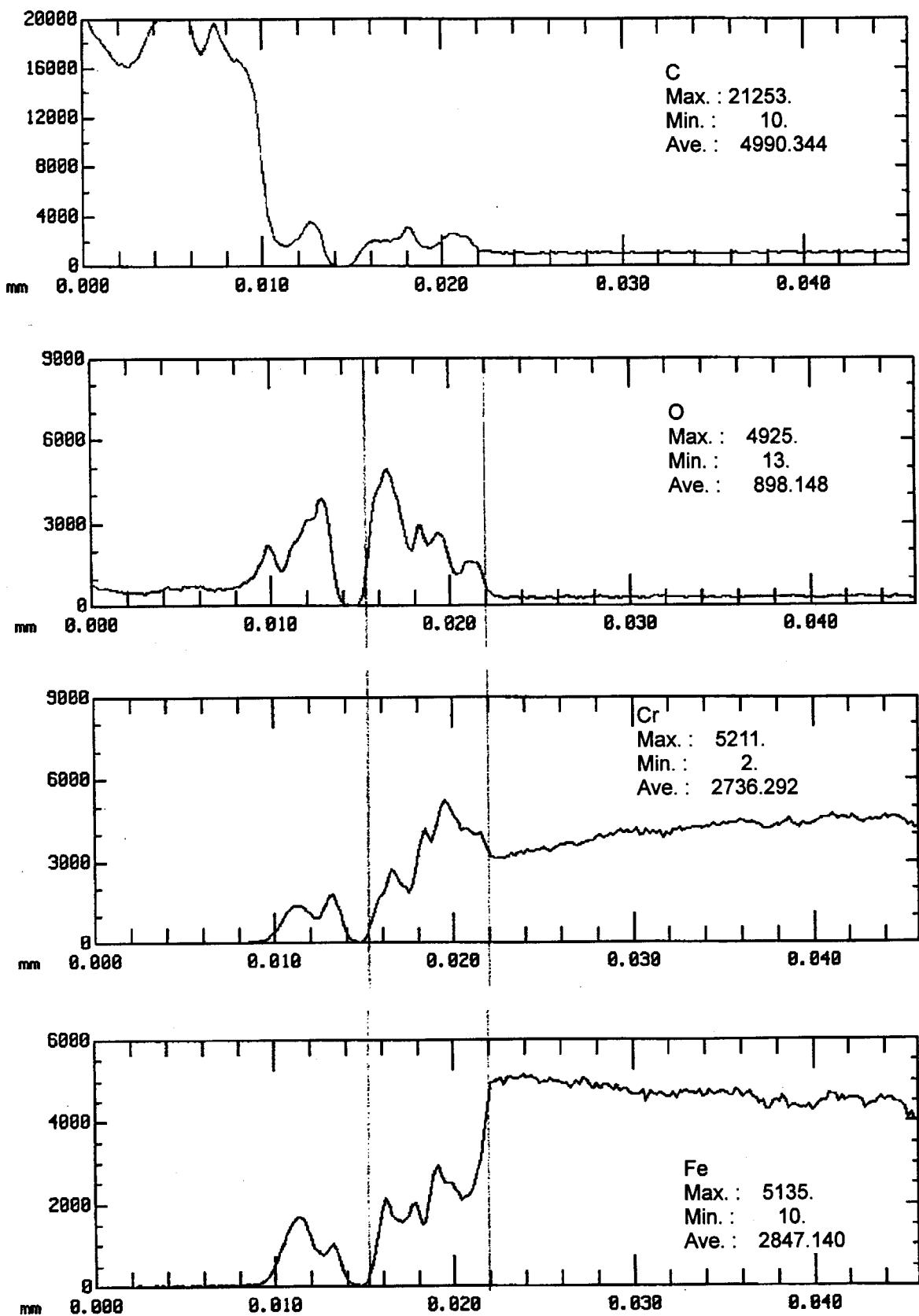


Fig.3.17 Results of EPMA (No.1 - ②: 2nd time)

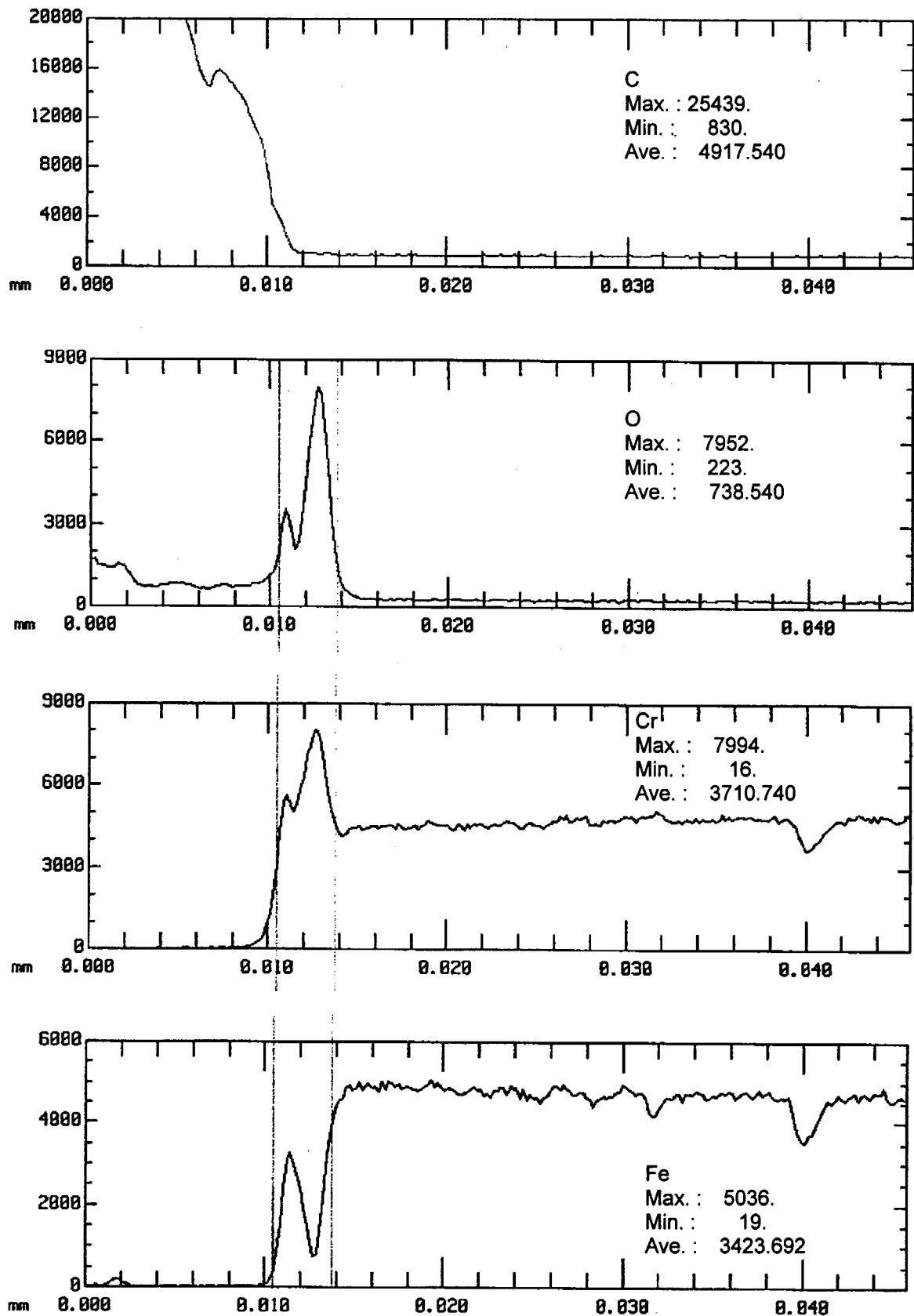


Fig.3.18 Results of EPMA (No.2 - ①)

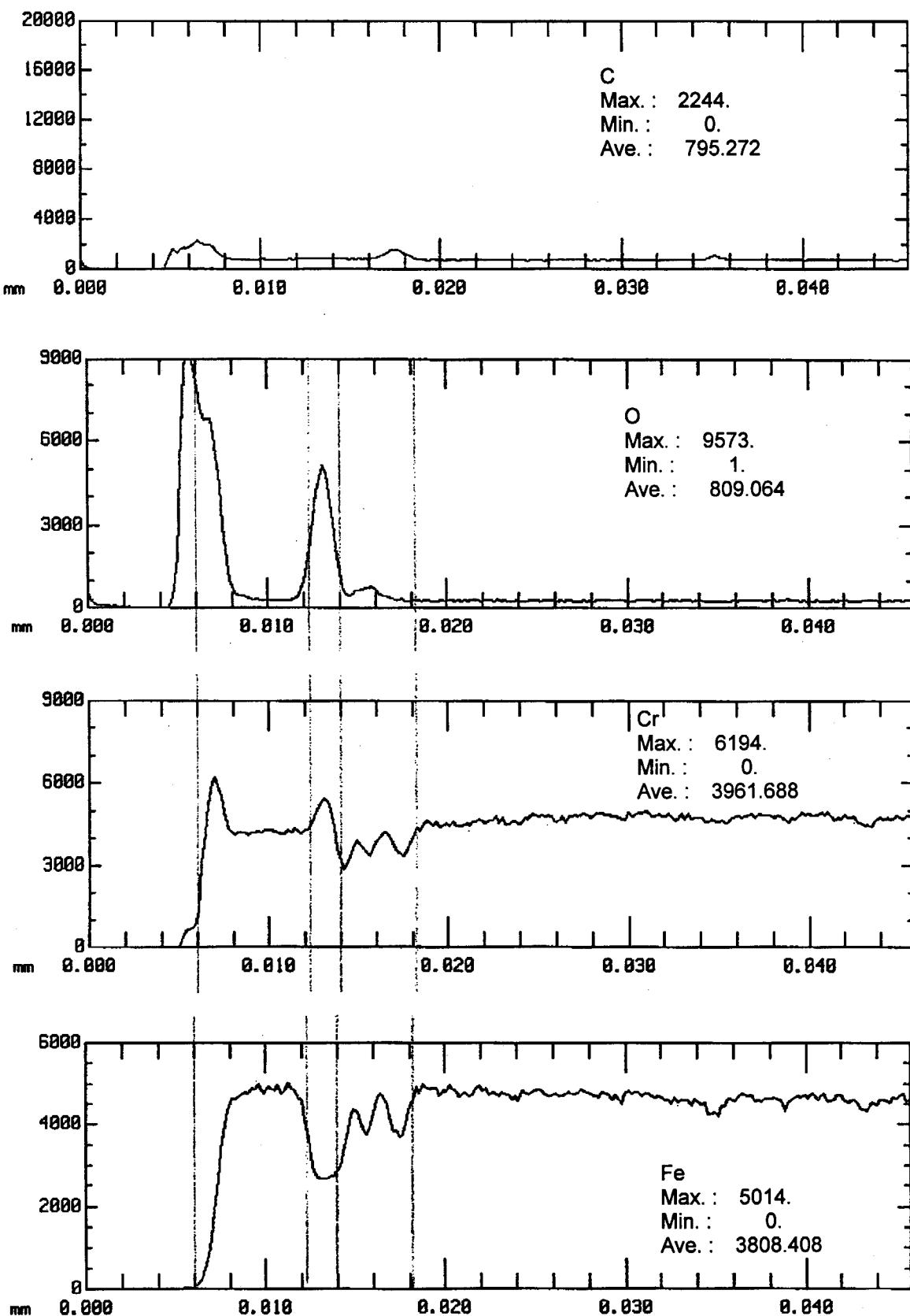


Fig.3.19 Results of EPMA (No.2 - ②)

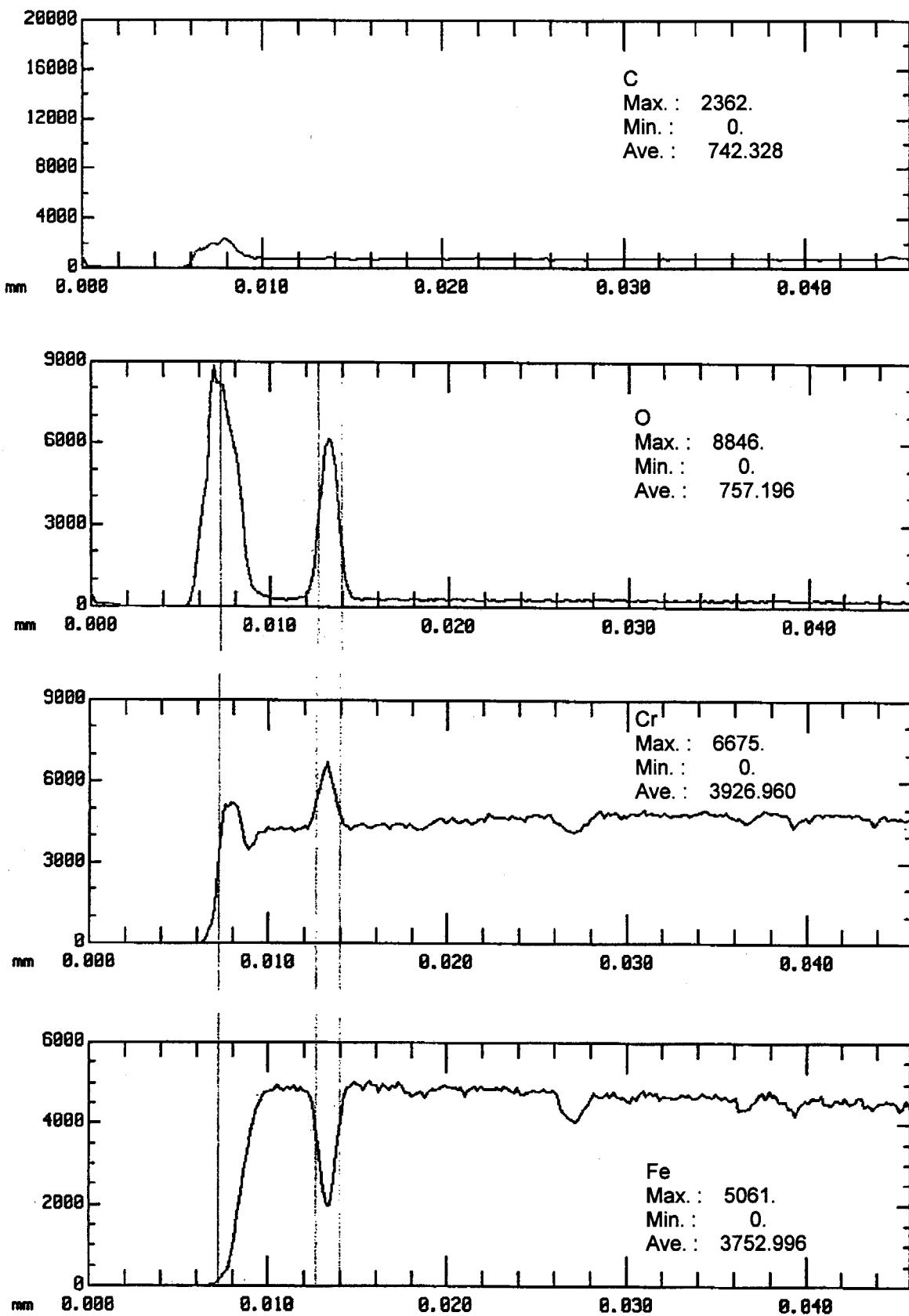


Fig.3.20 Results of EPMA (No.2 - ②: 2nd time)

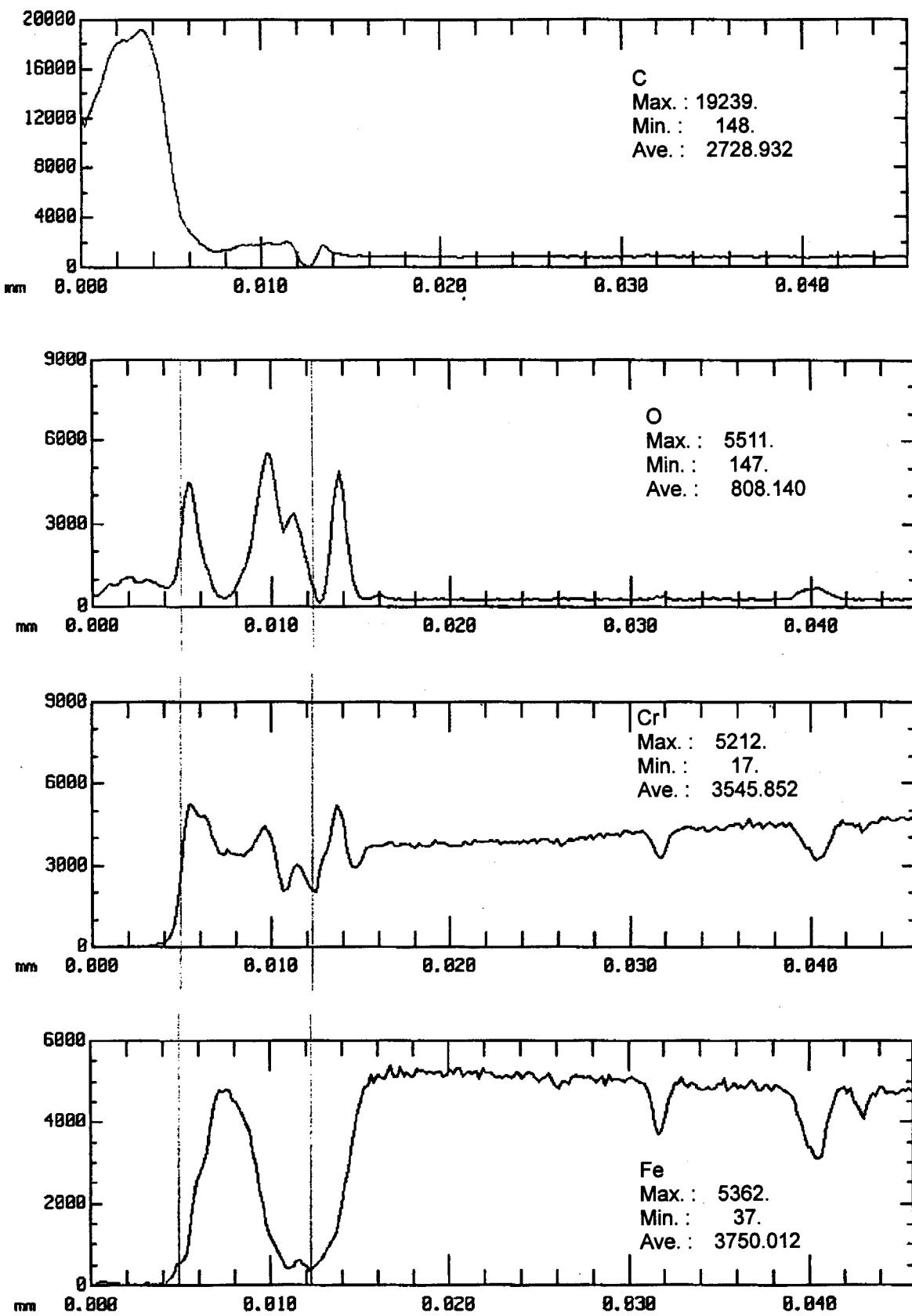


Fig.3.21 Results of EPMA (No.3 - ①)

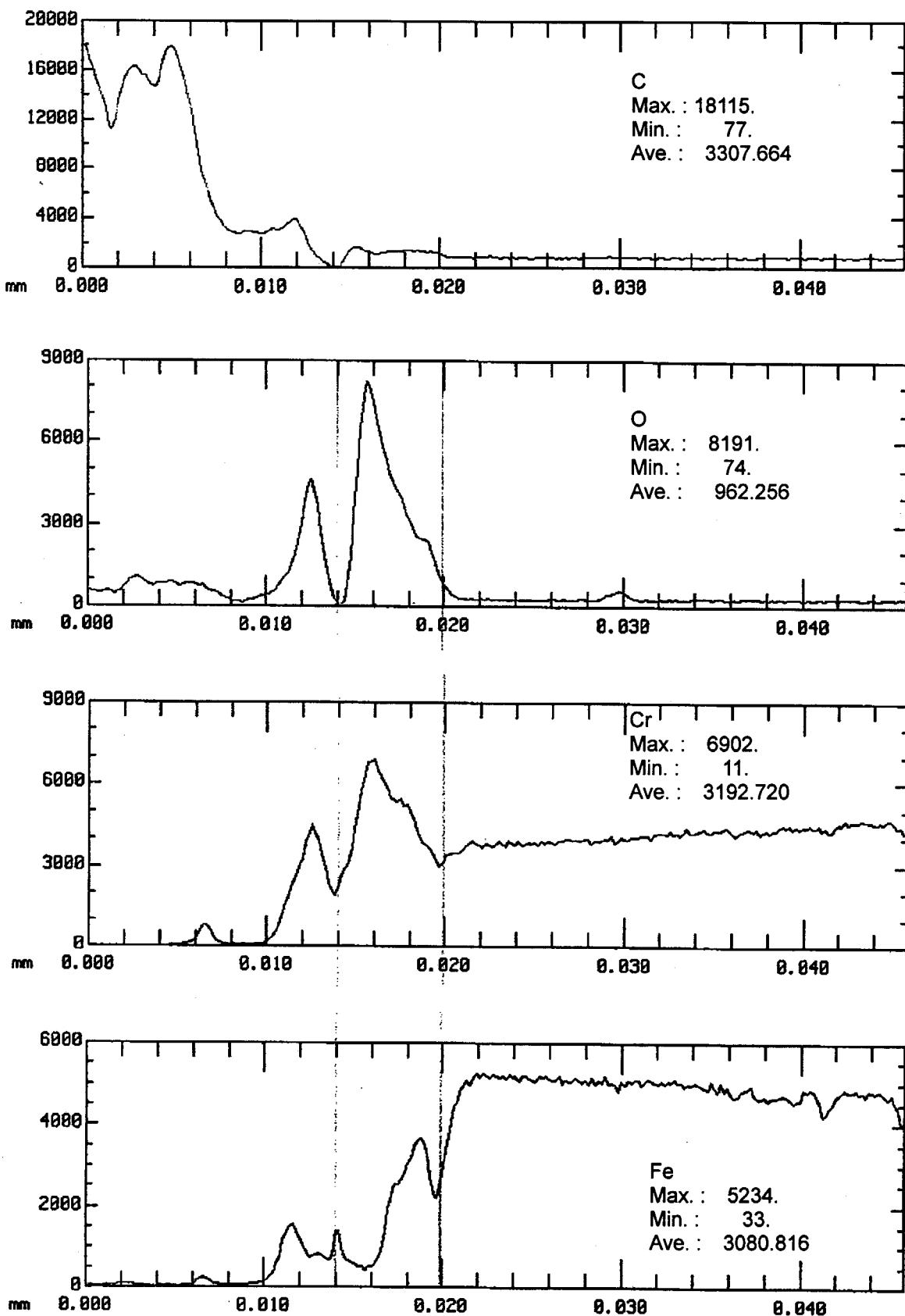


Fig.3.22 Results of EPMA (No.3 - ① : 2nd time)

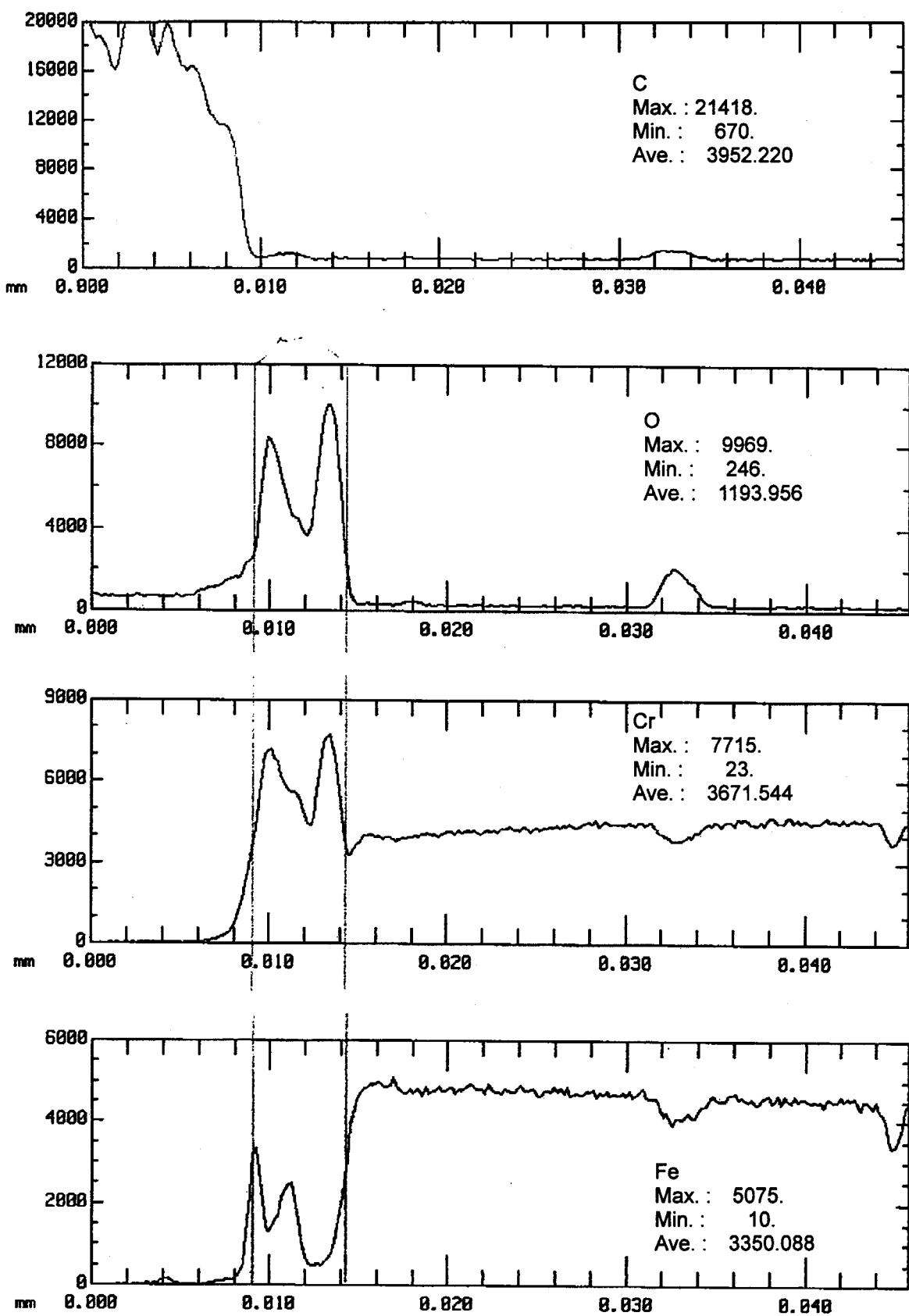


Fig.3.23 Results of EPMA (No.3 - ②)

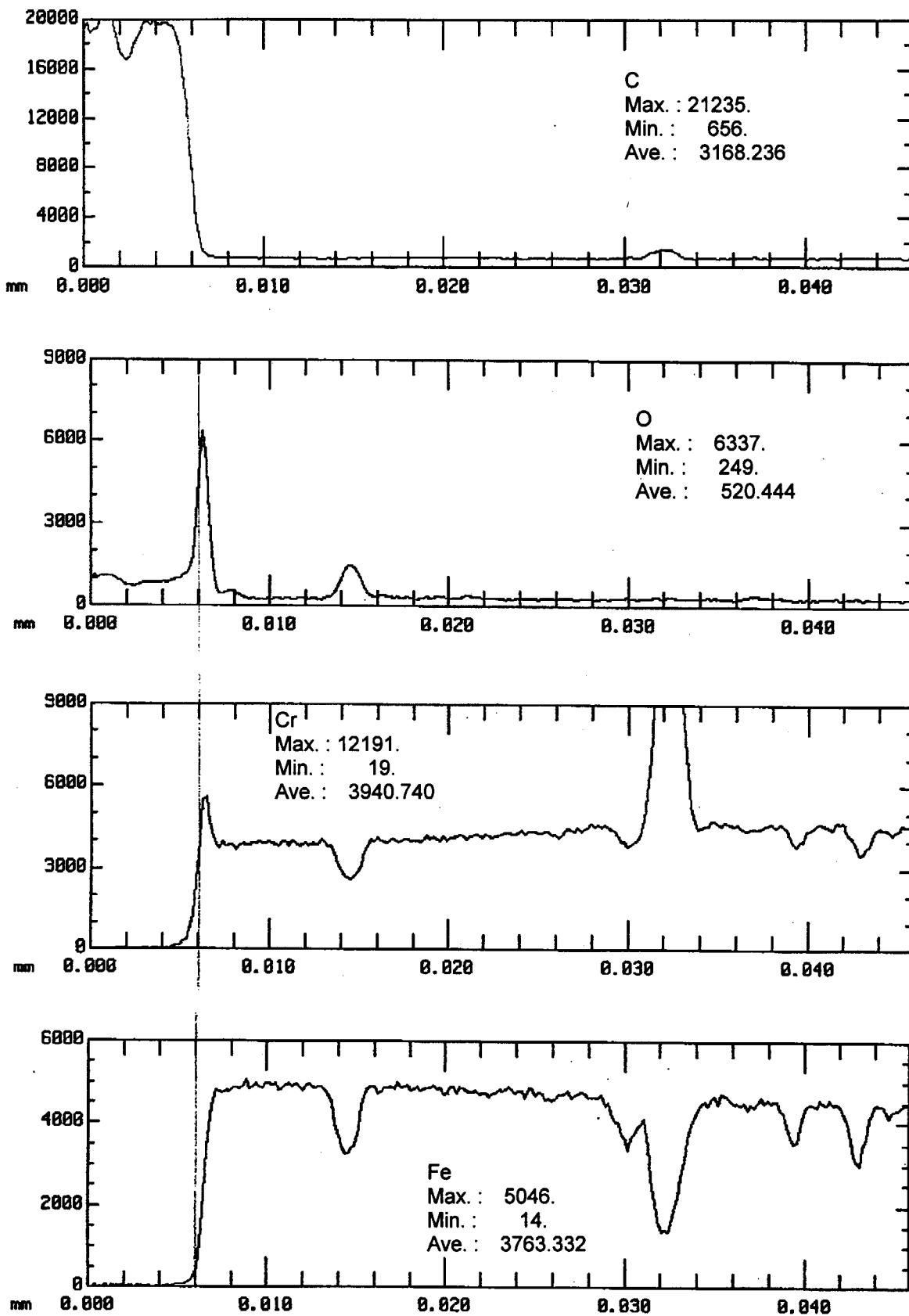


Fig.3.24 Results of EPMA (No.3 - ② : 2nd time)

4. 結 論

HTTRの中間熱交換器伝熱管やその熱利用系として接続する水蒸気改質器触媒管を透過する水素同位体透過量の低減効果を調べるために、水素透過試験装置を用いて、ハステロイXR製円管の表面に、高温のヘリウムガス雰囲気中で酸化膜を自然形成させた場合について重水素透過量を求めた。試験の結果、得られた知見は以下の通りである。

- (1) 約 600°C～800°C のヘリウムガス雰囲気で約 150 時間加熱された試験管の表面においても酸化膜が形成されるため、重水素の透過量は減少した。
- (2) 加熱処理時間の増大に対し、定性的には重水素透過量が減少することを確認した。しかしながら、本試験の加熱処理時間の範囲および試験部の構造上の問題から、酸化膜厚さのばらつきが大きく、重水素透過量の酸化膜厚さに対する定量評価はできなかった。
- (3) 水分濃度が 1ppm 以下のヘリウムガス雰囲気で約 3000 時間加熱処理されたハステロイXRでは、 $1/5$ 以下の水素同位体透過量低減効果を有することを確認した。したがって、HTTRや将来の実用高温ガス炉の中間熱交換器(IHX)伝熱管表面では十分厚い酸化膜が形成されると予想され、少なくとも $1/5$ 以下の透過低減効果が期待できる。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、貴重なご助言をいただいた日本原子力研究所核熱利用研究部部長塩沢周策部長、同部小川益郎次長、同部高温機器開発試験室稻垣嘉之室長に感謝の意を表す。また、酸化膜分析にご助力いただいた钢管計測(株)の栗木良郎氏、及び試験装置の運転にご助力いただいた原子力エンジニアリング(株)の柴田一之氏に謝意を表す。

参考文献

- (1) S. Shiozawa, et al., Proc. of the 12th Pacific Basin Nuclear Conference, Vol. 2, 1007-1018, Seoul, Korea, Oct. 29 - Nov. 2 (2000).
- (2) K. Hada, et al., JAERI-Conf, 96-010, p.229 (1996).
- (3) 稲垣嘉之, 他, 原子力誌, 41, 250-257 (1999).
- (4) 武田哲明, 他, 原子力誌, 42, 204-211 (2000).
- (5) 武田哲明, 岩月仁, 原子力誌, 43, 823-829 (2001).
- (6) 西原哲夫, 高野 栄, JAERI-Tech, 99-080 (1999).
- (7) 西原哲夫, 岩月仁, JAERI-Tech, 99-078 (1999).
- (8) S. Saito, et al., JAERI-1332, P.109 (1994).
- (9) 太田時男監修:“水素エネルギー最先端技術”, NTS, (1995).
- (10) 深井有, 他:“水素と金属”, 内田老鶴園, (1998).
- (11) R.A. Strehlow and H.C. Savage, Nucl. Technol. 22, 127-137 (1974).
- (12) A.S. Zarchy and R.C. Axtmann, Nucl. Technol., 39, 258-265 (1978).
- (13) A.S. Zarchy and R.C. Axtmann, Nucl. Mater., 79, 110-117 (1979).
- (14) H.D. Rohrig, et al., Nucl. Engrg. Des., 34, 157-167 (1975).
- (15) Y. Mori and T. Nakada, BNES Conf. on the HTR and Process Appl., Paper 49, Inst. of Civil Eng., Westminster, London, Nov. 26-28 (1974).
- (16) K. Masui, et al., Trans. ISIJ, 19, 547-552 (1979).
- (17) 難波, 他, 日本金属学会誌, 42, 374-380 (1978).
- (18) W.M. Robertson, International Meeting on Hydrogen in Metals, II, 449, Julich, Germany, March 20-24 (1972).
- (19) 武田哲明, 他, JAERI-Tech, 98-044 (1998).
- (20) T. Takeda, et al., Proc. of the 6th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICON-E-VI), Paper No.6125, San Diego, CA, May 10-14 (1998).
- (21) H. Katsuta and K. Furukawa, J. Nucl. Sci. Technol. 18, 143 (1981).
- (22) W.A. Swansiger and K. Bastasz, J. Nucl. Mater. 85&86, 335 (1979).
- (23) 近藤達夫, 他, JAERI-M, 86-003 (1986).

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
光强度	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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーケンス	S	A/V
磁束密度	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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
光強度	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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

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)

1. 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。

2. 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。

3. 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。

4. 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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	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 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
	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	

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

(86年12月26日現在)

HTR水素製造システムの水素同位体透過に関する研究—(II)酸化膜による重水素透過の低減効果—(受託研究)

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。