

JAERI-Tech  
99-078



JP0050002



HTTR水素製造システムの高温隔離弁の  
概念設計及び弁座盛金材料の選定  
(受託研究)

1999年11月

西原哲夫・岩月 仁

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高温隔離弁の概念設計及び弁座盛金材料の選定  
(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・岩月 仁\*

(1999年10月4日受理)

HTTR水素製造システムでは2次ヘリウム配管が原子炉格納容器を貫通するため、格納容器貫通部に隔離弁を設置する必要がある。この2次ヘリウムは約905℃、4.1MPaの高温高圧で中間熱交換器から供給されるが、このような条件下で使用可能な隔離弁はこれまで実用化されていない。唯一、昭和40年代後半から50年代前半にかけて実施された原子力製鉄プロジェクトにおいて、中型の高温隔離弁が試作され、基礎試験が実施された。その実験結果から、基本的な性能は満足し、実用化の見通しが示されたが、いくつかの検討課題も報告されている。

そこで、抽出された課題について検討し、HTTR水素製造システムで使用する高温隔離弁の概念設計を行った。さらに、3次元弾性応力解析を行い、構造健全性を明らかにした。

次に、弁座盛金材料に関して、調査・検討を行い、ステライト合金及びニッケル基超合金から候補材料を選定した。そして、溶接施工性、高温下での特性変化等を予備調査し、使用可能性について検討した。その結果、ステライト合金については、溶接部のはく離、母材(ハステロイXR)への浸炭等による強度的な影響、また、ニッケル基超合金については、ヘリウムガス中での内部酸化等の金属組織的な影響を明らかにする必要があることが分かった。そこで、これらの材料について、ヘリウム雰囲気における耐久性、材料特性の変化を把握するための確性試験計画を立案した。

---

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

\* 外来研究員(石川島播磨重工業株式会社)

Conceptual Design and Selection of Deposited Metal on the Valve Seat  
for the High Temperature Isolation Valve in the HTTR Hydrogen Production System  
(Contract Research)

Tetsuo NISHIHARA and Jin IWATSUKI\*

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

(Received October 4, 1999)

In the HTTR hydrogen production system a high temperature isolation valve should be provided outside the penetration of containment vessel on the secondary helium loop. As the secondary helium gas is at temperature of 905°C and pressure of 4.1MPa, there is not any available isolation valve used under such conditions. Once demonstration test of high temperature isolation valve was carried out in the ERANS project. Tested valve could meet the basic design requirements but some problems remained.

In this report a conceptual design of the high temperature isolation valve is performed in consideration of resolving these problems. The structural reliability is confirmed by the three-dimensional stress analysis.

With respect to the deposited metal on valve seat, a screening test is done to observe the basic properties of candidate metals. From these results, it is shown that Stellite alloy that is used in practical valve has a possibility of the separation at welding layer and carbon diffusion from deposited metal into the base metal. Nickel-base super alloy has a possibility of internal and intergranular oxidation due to contained Al and Ti. Therefore, detail metallographical and mechanical tests for long period are planned to select the adequate deposited metal.

Keywords : HTTR, Hydrogen Production System, Isolation Valve, Conceptual Design,  
Three Dimensional Stress Analysis, Deposited Metal, Stellite Alloy,  
Nickel-base Super Alloy, Metallography

---

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

\* On leave from Ishikawajima-Harima Heavy Industry Co. LTD.

## 目 次

1. 緒言	1
2. 過去の研究開発成果	2
2.1 原子力製鉄	2
2.2 HTTR用高温隔離弁の予備設計	2
3. 高温隔離弁の概念設計及び応力解析	4
3.1 構造上の特徴	4
3.2 応力解析	5
4. 弁座盛金材料の選定	8
4.1 実用弁座盛金材料の調査	8
4.2 候補材料の選定	8
4.3 スクリーニング試験	9
4.3.1 試験項目	9
4.3.2 試験結果	9
4.3.3 考察	12
5. 盛金材料の確性試験計画	13
5.1 試験項目	13
6. まとめ	15
謝辞	15
参考文献	16

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Achievement of Former R&D .....	2
2.1 ERANS .....	2
2.2 Preliminary Design for HTTR System .....	2
3. Conceptual Design and Stress Analysis .....	4
3.1 Structural Features .....	4
3.2 Stress Analysis .....	5
4. Selection of the Deposit Metal on Valve Seat .....	8
4.1 Survey of the Practical Valves .....	8
4.2 Selection of Candidate Materials .....	8
4.3 Screening Test .....	9
4.3.1 Test Items .....	9
4.3.2 Results .....	9
4.3.3 Discussion .....	1 2
5. Tests for Decision of the Deposit Metal .....	1 3
5.1 Test Items .....	1 3
6. Conclusion .....	1 5
Acknowledgement .....	1 5
References .....	1 6

## 1. 緒言

高温ガス炉から供給される約 950°C の高温核熱を用いて、水素等のクリーンなエネルギーを製造する高温核熱利用プロセスは、熱源からの CO<sub>2</sub> の放出がないため、地球環境問題の解決に大きく貢献できる<sup>(1)</sup>。そこで、日本原子力研究所では、高温工学試験研究炉 (HTTR) にメタンの水蒸気改質による水素製造システムを接続し、高温核熱利用の有用性の実証並びに利用技術の開発を行うことを計画し、研究開発を進めている<sup>(1) - (4)</sup>。HTTR 水素製造システムの概略系統構成を Fig.1.1 に示す。

本システムでは、原子炉で加熱された 1 次ヘリウムは中間熱交換器 (IHX) で 2 次ヘリウムを加熱し、この 2 次ヘリウムを熱源として水素を製造する。また、水素製造システムは原子炉建屋外側に設置されるため、2 次ヘリウム配管は原子炉格納容器を貫通し、原子炉建屋外部まで引き回される。このような原子炉格納容器を貫通する配管には、放射性物質放出事故の影響軽減対策として、隔離弁を設けなければならない。しかし、2 次ヘリウムは定格運転時に約 905°C、4.1MPa と高温高圧となっており、このような条件下で使用できる隔離弁は実用化されていない。

これまで高温高圧のヘリウムを対象とした隔離弁の試作、試験が日本及びドイツで実施された<sup>(5) (6)</sup>。日本ではアングル型隔離弁を採用して基礎試験を行い、試験期間内では漏洩率等の設計要求を満足できることが示されたが、解体検査によりいくつかの検討課題が報告された<sup>(7)</sup>。これらの課題の大部分は、近年の技術進歩及び設計手法の確立により解決可能であるが、弁座盛金材料に関する開発は未着手のままである。

そこで、摘出された課題について検討し、高温隔離弁の構造設計を行うとともに、3次元弾性応力解析により構造健全性を確認した。さらに、弁座盛金材料として使用可能な合金の調査を行い、候補材料を選定するとともに、これらの合金を用いた予備試験を行い、適用可能性について検討した。そして、盛金材料を決定するための確性試験計画を立案した。

## 2. 過去の研究開発成果

昭和40年代後半から50年代前半にかけて実施された原子力製鉄プロジェクトにおいて高温隔離弁（当時は緊急遮断弁と称した）の試作、試験が行われ有益な情報が得られている。そして、この成果を基に、HTTR水素製造システム用高温隔離弁の予備設計を行った。その概要を以下に示す。

### 2.1 原子力製鉄

原子力製鉄プロジェクト（正式名称：高温還元ガス利用による直接製鉄技術の研究開発）において、高温隔離弁の設計データを得る目的で、各種基礎試験が実施された。弁構造としては、弁座及び弁体の対称性がよく弁箱のひずみの影響を受けにくいこと、作動時の摺動が少ないこと及び内部断熱構造とする場合の施工性がよいこと等の理由から、アングル弁が採用された。基礎試験として、耐圧試験、内圧・外圧に対する応答試験、弁座漏れ試験、加熱試験及び作動試験が行われ、基本性能は確保できることが示され、実用化の見通しを得ている。ただし、試験後に分解検査を行い、下記の問題が明らかにされた<sup>(7)</sup>。

- ・弁座の平面度の狂い
- ・弁開時に弁棒に作用する引張力による弁棒のクリープ変形
- ・グランドパッキンのシール性能の低下
- ・パッキンの摺動による弁棒の傷
- ・ガスケットの酸化による劣化
- ・断熱材の変形
- ・弁座面の盛金材料（TCW：ステライトにタングステンカーバイドを添加）の欠落

なお、本プロジェクトは昭和55年度で終了したため、これらの課題について新たな研究開発は行われていない。

### 2.2 HTTR用高温隔離弁の予備設計

原研では、平成2年度からHTTR水素製造システムの設計研究を進めてきた。高温隔離弁の開発に関しては、HTTR水素製造システムで要求される設計条件を明らかにするとともに、原子力製鉄での成果を有効に利用する観点から、当時の設計概念を基に、いくつかの改良点を加えたHTTR水素製造システム用高温隔離弁の構造を検討し、構造健全性評価を行ってきた<sup>(7)</sup>。

#### (1) 設計条件

HTTRの高温隔離弁は、1次ヘリウム配管破損等により格納容器内に放射性物質が放出された場合に、格納容器から外部へ放射性物質が漏れいすることを防止する目的で設置するものである。さらに、本システム特有な設計基準外事象（シビアアクシデント）対策として、水素製造システムの水蒸気改質器反応管と2次ヘリウム配管の同時破損時に原子炉格納容器内へ可燃性ガスが流入する可能性があるため、その流入量を抑制する機能も追加要求している。これらを満足するように、Table2.1に示すHTTR用高温隔離弁の設計条件を定めた。



## (2) 構造概念

H T T R用高温隔離弁の基本構造は、原子力製鉄と同様、内部断熱式アングル型隔離弁とした。そして、弁本体の構造健全性及びシール性能の確保の観点から、弁座周辺部の構造、弁棒固定方式、フランジ部及びグランド部のシール方法に重点を置いて検討を行い、基本構造を定めた。

弁開時に弁棒に引張力が負荷されないようにするため、アクチュエータピストン内にストッパーを設けるとともに、弁体と弁座の密着性を向上させるために弁棒と弁体をT型ヘッドで連結し、弁体にフレキシビリティを持たせる構造を採用した。また、グランド部のシール方法としてペローズシールを、フランジ部のシール方法としてシール溶接を採用した。

## (3) 構造健全性評価

まず、2次元軸対称ソリッド要素モデルを用いて熱応力、内圧及び弁締切力に対する弁箱及び弁座の構造解析を行った結果、基本的には十分な強度を有していることが示された。しかし、弁座面の累積クリープ疲労損傷が1回の弁閉止当たり0.2とかなり大きな値となることが分かり、弁座面の応力を軽減させるための構造上の工夫が必要であることが示された。また、3次元ソリッド要素モデルを用いてシール性能に関する弁座面のうねりを評価した結果、最大で10 $\mu$ mであり、弁締切力及び弁座面形状の最適化を図ることで、許容漏洩量を満足できる見通しを得ている。

### 3. 高温隔離弁の概念設計及び応力解析

HTTR水素製造システムの設計進捗に伴い、2次ヘリウム配管との取り合い条件が変更された。そこで、原子力製鉄での課題及びHTTR用隔離弁の予備設計での問題点について検討し、高温隔離弁の概念設計を行った。そして、3次元弾性応力解析を実施し、強度評価を行った。

#### 3.1 構造上の特徴

本概念設計では、隔離弁としてのシール性能の確保、並びに、弁座盛金材料の健全性確保の観点から検討を行い、下記に示す構造対策を施した。これらの対策を反映した高温隔離弁の構造図を Fig3.1 に示す。

弁座の平面度を確保するためには、熱膨張時の弁座付近の不均一なひずみの発生を防止する必要がある。そこで、板厚を増すことにより弁箱の剛性を増強するとともに、弁座付近の軸対称性を向上させた。

弁座シート面の形状としては円錐座と平面座の2種類が考えられ、いずれも豊富な使用実績を有している。これらの座の特徴について比較した結果を Table3.1 に示す。本隔離弁では弁座盛金材料の健全性確保が大きな課題となっているため、割れ、欠けの原因となるような応力をシート面に発生させることは極力避けなければならない。円錐座は、締付力は小さいが、弁座にはせん断力が発生し、さらにかじりにより弁座盛金材料を破損させる可能性がある。そこで、これまでの設計と同様、発生応力が圧縮応力のみで加工性に優れている平面座で対応する。

グランド部のシール方法としてはグランドシールとペローズシールの2種類が考えられる。これらのシール方法の特徴について比較した結果を Table3.2 に示す。一般的なシール性能はペローズシールの方が優れている。しかし、グランド部から高温高圧のヘリウムガスがリークしてくる場合、ペローズは高温となり、4.1MPa の圧力も受けるため、このような条件下で長期間使用できる実績のあるシール材料はない。また、ペローズシールの場合にはグランド部上部が長くなり、耐震性において不利となる。そこで、本隔離弁では、耐熱性能に優れたグランドシールを採用することとし、リーク量を低減するための対策を講じることとする。

グランドシールは経年劣化や温度上昇に伴う応力緩和によってリーク量が増加する。そこで、常に一定の圧縮力を付加してシール材の応力緩和を防止することにより、高いシール性能を長期間維持できるライブローディング機構を設置する。本隔離弁で採用したライブローディング機構は、皿ばねを使って一定の圧縮力を付加させる仕組みとなっており、これまで数多くの使用実績があるとともに、シール性能を飛躍的に向上させている。ただし、シール性能が向上することに比例して弁棒の摺動抵抗が増加するため、弁駆動部の容量はこの点を考慮して設定する必要がある。また、グランド部の温度上昇を抑制するためにボンネット部を若干長めにし、さらに放熱用のフィンを付け、グランドパッキンの温度上昇を抑制する。

弁座盛金材料の健全性を確保する上で弁締切時の衝撃荷重を緩和することは重要である。そこで、駆動方式について電動式とエアシリンダー式の特徴を比較した。その結果を Table3.3 に示す。駆動部に要求される機能は 30 秒以内に弁を締切ること及び弁座に過度の負荷を与えないことである。エアシリンダー式は開閉速度も速いが、シリンダー部が大型であることから隔離弁の重心

が高くなり耐震設計上不利な形状となる。また、開閉速度の制御が難しいため、締切時の衝撃荷重により弁座を損傷する可能性がある。一方、電動式はエアシリンダー式に比べると開閉時間は若干遅いが、本隔離弁の設計条件である 30 秒は十分満足できるとともに、モーターの制御により弁締切時の衝撃を緩和することができるため、弁座の健全性確保の観点から適している。また、比較的軽量で耐震上も優位であるとともに、弁棒の熱膨張による弁座へのスラストの増加を駆動部内部に設けた皿バネにより吸収できる。そこで、本設計では電動式を採用する。

### 3.2 応力解析

今回概念設計した高温隔離弁は、予備設計の段階から弁箱板厚及び弁座周辺部の構造が変更された。そこで、弁箱および弁座周りを対称として、3次元ソリッドモデルを用いた弾性応力解析を実施し、構造健全性を確認した。

#### (1) 弁箱板厚

弁箱の最小肉厚を規定する基準としては、「発電用原子力施設に関する構造などの技術基準」(告示 501 号) や ANSI B16.34 があり、圧力とバルブ内径に応じた肉厚を規定している。これらの基準を参考に必要板厚を算出すると 36.5mm となる。そこで、弁本体の剛性を高めるため、設計板厚は 45mm とする。

#### (2) 主要材料

本隔離弁で使用する主要材料は以下の通りである。

弁箱、蓋	: SCPH32 (2.25Cr-1Mo鋼)
弁座、弁体	: ハステロイ XR
内部断熱材	: アルミナシリカ系繊維状断熱材 (カオウール1400S)

#### (3) 物性定数

解析で使用した、熱伝導率、比熱、比重、弾性係数、ポアソン比、線膨張係数は Table3.4 に示す通りである。

#### (4) 解析モデル

隔離弁の対称性を考慮して、弁の円周上 1/2 を 3次元ソリッド要素でモデル化した。解析モデルの要素分割において、温度解析では内部断熱材もモデル化し、応力解析では強度部材でない断熱材は取り除いた。それぞれ、Fig.3.2 及び Fig.3.3 に示す。また、配管反力及び地震力の解析では入力される荷重が 6 成分となり、1/2 モデルでは解析が複雑となるため、弁全体をモデル化して解析を行った。その要素分割図を Fig.3.4 に示す。

#### (5) 荷重条件

##### 1) 内圧及び弁締切荷重

内圧及び弁締切荷重は Fig.3.5 に示す通りである。通常運転中は内圧 4.1MPa(42kg/cm<sup>2</sup>)

が弁内部に均一に負荷されるが、配管破断荷より隔離弁が作動する場合は、入口側もしくは出口側のどちらか一方にのみ内圧が負荷される。弁締切荷重に関しては、内圧 4.1MPa のヘリウムガスをシールするために必要なスラスト力は約 20.5ton であり、これを弁座シート面の面積 67.9cm<sup>2</sup> (外径 22.6cm、内径 20.6cm) で除した約 3.0kg/cm<sup>2</sup> が弁座に負荷される。

## 2) 熱過渡

熱過渡事象としては Fig.3.6 に示す通り、通常運転 (起動一定格運転-停止) と異常温度上昇の 2 事象について熱応力解析を行う。弁箱内部の弁座、弁体周りの熱伝達率  $\alpha$  は、ヘリウムが流れている場合はライナー内表面の熱伝達率と同じとみなし、円管の熱伝達率の式を用いて計算し、 $\alpha = 864\text{W/m}^2\text{K}$  とした。一方、弁箱外部の熱伝達率は、周囲の温度を 40℃ と仮定し、自然冷却されるとして、 $\alpha = 11.6\text{W/m}^2\text{K}$  とした。また、弁閉止後は弁箱内部を断熱として解析を行った。

## 3) 配管反力、自重及び地震力

配管反力、自重及び地震力は Table3.5 に示す値を用いた。

## (6) 解析結果

Fig.3.7~Fig.3.14 に 3 次元弾性応力解析結果 (Mises の相当応力) を示す。

内圧に関しては、弁開時、最大応力は弁出口部のエルボ部で発生し、約 6 kg/mm<sup>2</sup> である (Fig.3.7)。また、弁閉時出口側負荷の場合もほぼ同じ特性を示す。一方、弁閉時入口側負荷の場合、最大応力は弁座先端で発生し、約 3.3kg/mm<sup>2</sup> である (Fig.3.8)。

弁締切力に関しては、応力は弁座先端で最大となり、約 2.6kg/mm<sup>2</sup> である (Fig.3.9)。

熱過渡に関しては、起動時と異常時でほぼ同じ特性を示す。最大応力は弁座付根部で発生し、約 20kg/mm<sup>2</sup> とかなり大きな値となっている (Fig.3.10, Fig.3.11)。これは、断熱材の厚さが弁座軸方向で異なるため、弁座に大きな温度勾配がついていること、及び、付け根部は温度が低いため拘束点になることに起因する。また、弁座先端部でも比較的大きな熱応力が発生する。

配管反力、自重、地震力は小さいため、弁に作用する応力はいずれも小さくなる (Fig.3.12~Fig.3.14)。

## (7) 強度評価

高温ガス炉の構造設計基準<sup>(8)</sup>に従い、強度評価を行った。評価断面は高温となる弁座先端部及び熱応力が大きい弁座付根部とした。評価断面を Fig.3.15 に示す。評価には各事象の想定回数として以下のものを用いた。

- ・通常運転 (運転状態 I) : 300回
- ・異常、事故時 (運転状態 II 及び III) : 210回

評価結果を Table3.6 に示す。通常運転及び異常事故時とも、1 次応力、1 次+2 次応力は制限値を満足しているが、弁閉状態となる異常事故時では弁座先端部の 1 次応力が大きくなるため、クリーブ損傷が大きくなり、弁締切 1 回あたりの損傷量は 0.008 となる。従って、上記の異常事故時の想定回数すべてで隔離弁が作動すると仮定すると、制限値を満足しなくなる。

しかし、隔離弁が作動するのは格納容器内部で放射性物質が放出された場合で、このような事

故は運転状態Ⅲ及びⅣであり、想定回数は高々10数回である。また、運転寿命中の誤作動を考慮しても、総作動回数は40回程度を見込めば十分である。この場合、クリープ損傷は0.32となり制限値を十分満足する。

#### 4. 弁座盛金材料の選定

原子力製鉄で試作、試験された高温隔離弁の弁座盛金材料には、耐摩耗性、耐腐食性等の観点からステライト合金をベースとして、タングステンカーバイドを添加したTCWという合金が使用された。そして、開放検査から、TCWのクラック、硬度低下、ピンホールの発生等が報告された。この原因としては、TCWの酸化による強度低下、過大な締切荷重の繰り返しによる疲労等が考えられる。すなわち、高温ヘリウム雰囲気中で金属組織が安定で、かつ、高温下での繰り返し締切荷重に耐えうる盛金材料を選定することが、高温隔離弁の開発に必要な不可欠な課題である。そこで、弁座盛金材料として使用可能な合金を選定するとともに、スクリーニング試験を行い、適用可能性について検討した。

##### 4.1 実用弁座盛金材料の調査

Table 4.1 に国内外の弁メーカーについて高温隔離弁の製造実績を調査した結果を示す。高温条件下で使用する弁の製造実績は非常に少ない。これらの弁において使用されている盛金材料はコバルト基のステライト No.6 が主流であることが分かる。海外の弁メーカーの一部ではコーティングを採用しているものもあった。ただし、原子力製鉄で使用した弁を除いて、いずれの弁においても、温度条件及び圧力条件がHTTRの設計条件を下回っている。

##### 4.2 候補材料の選定

原子力製鉄で使用された盛金材料 TCW は、基本的には弁座盛金材料として要求される機能を有していたが、ヘリウム雰囲気での使用に関して若干の問題が発生した。そこで、HTTR水素製造システムではTCWに替わる盛金材料を選定する。

実用高温弁としての実績及び原子力製鉄での成果を考えると、ステライト合金の適用可能は十分高い。そこで、市販のステライト合金の中で最も高温強度の高いステライト No.1016（以下、ステライト 1016）と、幅広く使用されているステライト No.6 に  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粉末を添加したステライト複合材料を候補材料に選定した。ステライト複合材料は、硬質材料である  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粉末をステライト合金の No.6 中に分散することにより、高温強度向上を狙ったものであり、基本的にはTCWと類似の材料である。なお、 $\text{Cr}_3\text{C}_2$  の添加量が多くなれば高温強度は向上するが、炭素含有量が多くなることにより溶接施工性が低下するため、施工性が維持できる上限と予想した 40wt%を混合することとした。

一方、ニッケル基超合金は高温機器での使用実績が十分あり、材料データが十分整備されている材料である。また、弁体のハステロイ XR もニッケル基合金であることから接合性に優れていると考えられる。そこで、ジェットエンジンにおける高温回転体としての使用実績があり、耐摩耗性、低摩擦摺動性に優れていると考えられる、MAR-M247（以下、MM247）及び Udimet520（以下、SA52）を候補材料として選定した。

これらの合金の化学組成を Table4.2 に示す。

### 4.3 スクリーニング試験

選定した材料を用いて、ハステロイ XR との溶接施工性、高温下での硬さ、時効による金属組織変化を調査し、盛金材料として使用できる可能性があるか検討を行った。

#### 4.3.1 試験項目

スクリーニング試験として以下の試験を行った。

##### (1) 溶接部の表面検査(PT 検査)

溶接後の表面割れを検査し、溶接施工性を確認する。

##### (2) 断面観察

母材への溶け込み状況、割れを検査し、溶接施工性を確認する。

##### (3) EPMA 分析

母材及び盛金材料の成分変化を検査し、溶接による組織変化を確認する。

##### (4) 室温硬さ試験

室温における硬さを測定し、弁として使用に適する硬さを有しているかを調査する。

##### (5) 高温硬さ試験

900℃における硬さを測定し、弁として使用に適する硬さを有しているかを調査する。

##### (6) 200 時間時効試験

供試材を 900℃、大気中において時効し、時効後の組織観察、EPMA 分析、硬さ試験を実施する。そして、酸化及び時効に伴う盛金材料の金属組織及び硬度の変化を評価する。

供試材としてはハステロイ XR 圧延材に候補金属を粉体プラズマ溶接としたものを使用した。

#### 4.3.2 試験結果

##### (1) ステライト合金

###### 1) PT 検査

Fig.4.1 に PT 検査結果を示す。両供試材とも終端部にクレータは認められるものの、割れは観察されない。すなわち、溶接施工性に関しては特に問題がないことがわかる。

###### 2) 断面観察

Fig.4.2 に断面組織を示す。両供試材とも母材の希釈の影響を受け、表面から母材境界まで連続的に変化している。また、ステライト合金とハステロイ XR の金属組織が著しく異なっている。ステライト合金は炭素含有量が多いことから、両供試材とも浸炭層が認められ、ステライト 1016 では約 200 μm、ステライト複合材料では約 100 μm であった。ステライト複合材の方が小さいのは、ステライト No.6 の炭素含有量が少ないためと考えられる。

ステライト複合材料で認められる白い塊状の相は、強度向上のために添加した Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> である。

###### 3) EPMA 分析

表面近傍の組成像、及び各元素の X 線像を Fig.4.3 及び Fig.4.4 に示す。

ステライト 1016 で、組成像での白い相は W が濃化しており、マトリックスの Co との化合物と考えられる。濃い灰色の相は Cr と C が濃化しており、Cr を主成分とする炭化物が生成されたと考えられる。

ステライト複合材料で、組成像での中央の黒い相は添加した  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  であり、白い相は Co ベースのマトリックスと考えられる。灰色の相は Cr を主成分とする炭化物である。通常のステライト No.6 では、このような炭化物は存在しないことから、プラズマ溶接の過程で原料の  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  の一部が母相に溶解した後、冷却過程で再晶出したものと考えられる。従って、ステライト 1016 の炭化物も同じメカニズムで析出したものと考えられる。

#### 4) 室温硬さ試験

表面から母材境界までの硬さのプロファイルを Fig.4.5 及び Fig.4.6 に示す。

ステライト 1016 では、表面近傍の硬さは約 Hv700 であり、表面から母材に向けて徐々に硬度が低下しているが、これは母材成分の希釈の効果によるものと考えられる。

ステライト複合材料の表面近傍の硬さは約 Hv840 であり、ステライト 1016 より若干高く  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  の効果が認められる。硬さの変化はステライト 1016 と同様である。

#### 5) 高温硬さ試験

Fig.4.5、Fig.4.6 からわかるように、盛金材料の硬さは位置によって異なる。しかし、弁座盛金としての使用を考えた場合、表面の硬さが重要となる。そこで、本試験では表面近傍の硬さを測定することとした。室温から 900°C の硬さ変化を Fig.4.7 及び Fig.4.8 に示す。

900°C の硬さは、ステライト 1016 では約 Hv450 であり、ステライト複合材料では Hv530 である。実際、中低温の弁座盛金材料として使用されているステライト No.6 の 600°C での硬さは約 Hv360 であることから、いずれも弁座盛金材としての硬さを有しているといえる。

#### 6) 200 時間時効試験

##### a) 断面観察

Fig.4.9 に時効後の断面組織を示す。両供試材とも酸化による著しい腐食は認められない。また、時効による割れの発生も観察されなかった。しかし、時効により母材の浸炭が促進され、その結果かなりの炭化物が析出している。

##### b) EPMA 分析

表面近傍の EPMA 分析結果を Fig.4.10 及び Fig.4.11 に示す。

ステライト 1016 では W と Co が濃化した白い相の割合が増加している。すなわち、この層は時効により析出量が増えることが予想される。酸素は最表面で濃化しているが、内部の間では浸透していない。つまり、酸化膜は表面に形成され、内部酸化は発生していないことがわかる。

ステライト複合材では、酸化に関してはステライト 1016 と同様、表面に酸化膜が認められるのみである。また、マトリックス中に W が濃化した白い相の析出が認められる。ステライト No.6 の W 含有量は No.1016 の約 1/4 であることから、溶接後の EPMA 分析では観察されなかったが、時効により W が濃化した相の析出が進行することが明らかとなった。

##### c) 硬さ試験

時効後の室温硬さ試験結果を Fig.4.12 及び Fig.4.13 に示す。いずれも母材に向けての硬さ



の低下挙動は時効前と同様であり、時効による顕著な変化は認められない。

表面近傍の硬さは、ステライト 1016 が約 Hv700 と時効前と変化はなかったが、ステライト複合材料は約 Hv720 で時効により Hv120 硬度が低下している。ステライト複合材料では、顕著な組織変化はほとんどなかったことから、この硬さ低下は焼きなましによる軟化の効果によるものと考えられる。一方、ステライト 1016 では、この軟化の効果と W が濃化した析出物の効果が相殺し、硬さの変化はなかったものと考えられる。

## (2) ニッケル基超合金

### 1) PT 検査

Fig.4.14 に PT 検査結果を示す。MM247 については、止端部にクラックが多く見られた。SA52 については、PT 検査ではクラックは観察されなかった。

### 2) 断面観察

Fig.4.15 に MM247 の PT 検査で確認されたクラックの断面を示す。ビードの重なった部分にクラックが発生していることがわかる。ただし、クラックは母材との界面で止まっている。

Fig.4.16 に SA52 の断面組織を示す。これより、SA52 においてもクラックが発生していることが確認された。なお、今回観察した断面では、クラックの長さは 1mm 程度であった。また、盛金部の表面近傍にブローホールが確認された。

これらは割れ及びブローホールは溶接不良により発生したものであるため、溶接条件を最適化する必要がある。

### 3) EPMA 分析

表面から母材までの元素プロファイルを Fig.4.17 及び Fig.4.18 に示す。盛金及び母材でそれぞれ組成は均一であることから、母材からの希釈の影響は小さいといえる。界面での元素の拡散層は、MM247 で 100  $\mu\text{m}$  程度、SA52 材で 230  $\mu\text{m}$  程度であった。

### 4) 室温硬さ試験

表面から母材界面までの硬さのプロファイルを Fig.4.19 及び Fig.4.20 に示す。盛金の硬さはほぼ一定であり、これは母材の希釈の影響がなく、組成が安定していることに起因すると考えられる。表面での硬さは、MM247 は Hv470-480 程度、SA52 は Hv400 程度であり、ステライト合金に比べると硬度が低くなっている。界面において硬さが低下している領域は 0.5mm~1mm 程度であり、元素の拡散によるものと考えられる。

### 5) 高温硬さ試験

Table 4.3 に 900°Cにおける高温硬さを示す。MM247 が Hv260-300 程度、SA52 が Hv165 であり、ステライト合金と比べるとどちらも低い値となっている。この程度の硬度で弁座盛金として十分使用に耐えられるかは、別途検討する必要がある。

### 6) 200 時間時効試験

#### a) EPMA 分析

表面から母材までの元素プロファイルを Fig.4.21 及び Fig.4.22 に示す。界面での元素の拡散層は、MM247 で 290  $\mu\text{m}$  程度、SA52 で 350  $\mu\text{m}$  程度であり、時効により拡散層が拡大していることが分かる。拡散距離は時間の平方根に比例することから、MM247 の場合、拡散

層は 10000 時間後に 1.3mm まで拡大することも想定される。

#### b) 硬さ試験

時効後の室温での硬さのプロファイルを Fig.4.23 及び Fig.4.24 に示す。全体的に硬度が低下しているが、これはステライト合金と同様に、焼きなましにより溶接時の残留応力が解放されたためであると考えられる。なお、表面での高温硬さの低下量は室温での低下量と同等である。

界面付近の硬さが低下している領域は 0.5mm～1mm 程度であり、試験前と比較して特に変化は認められなかった。

#### 4.3.3 考察

ステライト合金は、溶接施工性、弁座盛金としての硬度に関しては問題ないことがわかった。しかし、母材と盛金材料の金属組織が顕著に異なること、並びに、浸炭により母材に大量の炭化物が析出することにより、溶接部に影響を及ぼし、熱応力や機械荷重によりはく離することが懸念される。また、時効により析出する W と Co の金属間化合物及びクロムカーバイドが、盛金材料の機械的性質にどのような影響を及ぼすのか明らかにする必要がある。

また、ステライト合金は原子力製鉄で使用した TCW と基本的には同種の材料であることから、ヘリウム中で脱炭が生じ、割れ、欠けを発生することが大いに考えられる。

ニッケル基超合金は、溶接による割れ、ブローホールが確認されたことから、今回の溶接条件に問題があることがわかった。また、時効により接合部の拡散層が増大したが、今回の試験範囲ではその影響が観察されなかった。

高温での硬度が若干不足していると考えられるが、ニッケル基超合金の硬度低下が焼きなましによるものであるとすれば、その低下量には下限がある。一方、ハステロイ XR では時効により炭化物が析出することが報告されており<sup>(9)</sup>、MM247 や SA52 でも同様に炭化物が析出するとすれば、析出硬化により硬度が増加することも考えられる。

ハステロイ X は、ヘリウム中では酸化ポテンシャルが小さく、表面の酸化量が少ないことから、Al、Ti などの元素が内部酸化を引き起こすことが報告されている<sup>(10)</sup>。すなわち、MM247 や SA52 は高温強度特性を向上させるために、比較的多くの Al、Ti を含んでいるため、弱酸化ポテンシャル雰囲気では内部酸化が発生する可能性がある。

これらの課題を解決するためには、長時間の時効試験を行い、金属組織の変化や硬度の変化を測定する必要がある。さらに、これらの材料が弁座盛金材料として適しているか判断するため、弁座として必要な機能（熱サイクルに対する健全性、締切力に対する耐久性等）が長時間確保されるか確認する必要がある。そこで、次節にこれらを確認するための試験計画案を示す。

## 5. 盛金材料の確性試験計画

高温隔離弁の弁座盛金材料の候補として選定したステライト合金及びニッケル超合金のスクリーニング試験から、いくつかの検討課題が抽出された。ステライト合金では、接合部のはく離、母材への浸炭及び脱炭による割れ、欠けである。一方、ニッケル超合金では、Al、Tiの内部酸化、及び高温での硬度不足である。そこで、これらの問題に関してその特性を明らかにし、適切な弁座盛金材料を選定するため、以下に示す確性試験を実施することを計画している。

### 5.1 試験項目

試験項目は、時効に対する材料特性を把握するために実施するもの[(1)、(3)、(4)]と、弁座盛金材料として必要な機能維持のために確認するもの[(2)、(5)~(8)]がある。

#### (1) 長時間時効試験

HTTR で使用している He ガスの近似雰囲気、もしくは類似の弱酸化ポテンシャル雰囲気において長時間暴露する。

試験材料：ハステロイ XR に候補材料を粉体プラズマ溶接したもの

(硬さ試験及び組織観察には平板に肉盛したもの、強度試験には所定の試験片に加工したものを暴露する。)

試験温度：900℃

雰囲気：ヘリウムガス もしくは 弱酸化ポテンシャル雰囲気

暴露時間：5000 時間程度

#### (2) 硬さ試験

盛金材料の硬さの変化を測定し、長時間時効による硬度低下量を評価して、設計寿命中、十分な硬度を維持できるか確認する。

試験材料：時効材及び未時効材

試験温度：室温から 900℃

雰囲気：大気中

#### (3) 金属組織観察

ステライト合金において、長時間時効後の脱炭、浸炭、析出物等に関してマイクロ組織観察、EPMA 分析を行う。

ニッケル超合金において、長時間時効後の内部酸化、炭化物の析出等に関してマイクロ組織観察、EPMA 分析を行う。

#### (4) 強度試験

下記の試験を行い、長時間時効による強度特性変化を確認する。接合部の強度がわかるように、試験片中央部(破断想定部)に溶接部、及び熱影響部がくるように試験片を製作する。試験片形

状、試験方法は、基本的に JIS の規定に従う。

1) 引張試験

試験材料：時効材及び未時効材

試験温度：室温から 900℃

雰囲気：大気中

2) 疲労試験

サイクル：流体振動を模擬した高サイクル疲労、熱サイクルを模擬した低サイクル疲労

試験材料：時効材及び未時効材

試験温度：室温から 900℃

雰囲気：大気中

3) 曲げ試験

試験材料：時効材及び未時効材

試験温度：室温から 900℃

雰囲気：大気中

4) クリープ試験

試験材料：時効材及び未時効材

試験温度：900℃

雰囲気：He ガス

(5) 摺動摩耗試験

Fig.5.1 に試験装置の概略図を示す。往復運動する中央部の板状試験片に先端が曲面の固定試験片を両側から接触させる。両試験片は高周波コイルで加熱し、摺動面近くに設置した 2 本のノズルより不活性ガス（ヘリウム等）を摺動面に吹き付け、表面の酸化を防止する。往復運動の摩擦抵抗を計測し、摩擦係数の経時変化を求める。

(6) 叩き試験

摺動摩耗試験と同一の試験装置で実施する。振動試験片を上下に振動させることにより固定試験片に衝突させ、繰り返し使用に対する盛金材料の耐久性を確認する。

(7) 熱サイクル試験

弁座を模擬した円管に盛金材料を溶接した試験体に、熱サイクルを負荷し、熱膨張係数の違いにより発生する熱応力により、盛金表面、接合部等に割れ、はく離等が発生しないことを確認する。

(8) 応力負荷試験

実機弁座を模擬した円筒形試験体に弁締切時の面圧と同等の圧縮応力を負荷し、焼付けを起こさないことを確認する。Fig.5.2 に試験装置（案）を示す。

## 6. まとめ

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。本システムでは、格納容器を貫通する2次ヘリウム配管に隔離弁を設置するが、高温高压条件下で使用可能な弁はこれまで開発されていない。そこで、HTTR用高温隔離弁の概念設計を行うとともに、いまだ開発に着手していなかった弁座盛金材料のスクリーニング試験を行い、検討課題を抽出した。

高温隔離弁の基本構造は、内部断熱式アングル型隔離弁とした。そして、これまでの検討から明らかにされている問題点を解決するために、幾つかの対策を施し、構造概念を確立した。主な対策は以下の通りである。

- ・ グランド部のシールは耐熱性を考慮して、黒鉛パッキンを使用したグランドシールとした。
- ・ シール性能を維持するため、ライブローディング機構を採用した。
- ・ グランド部の昇温防止のため、ロングボンネット+放熱フィンを採用した。
- ・ 弁閉時に弁座にかかる衝撃を緩和するため、電動式アクチュエーターを採用した。

さらに、3次元ソリッドモデルを用いた弾性応力解析を実施し、十分な強度が確保されていることを確認した。

これまで未検討であった弁座盛金材料に関して、候補材料の調査・検討を行い、弁座盛金材料としての使用実績が豊富なステライト合金及び高温機器での使用実績が豊富なニッケル超合金の中から、Stellite No.1016、Stellite No.6 + Cr<sub>3</sub>O<sub>2</sub> の複合材料、MAR-M 247、Udimet 520 (SA-52)の計4種類の合金を選定した。

これらの合金に対して、溶接施工性、高温下での特性変化等に関してスクリーニング試験を実施し、検討課題を抽出した。

そして、これらの課題を解明し、かつ弁座盛金として長期間の運転に対して必要な機能及び健全性が維持できるかを確認するための確性試験計画を立案した。

## 謝辞

隔離弁の構造検討及びスクリーニング試験に関しては、三菱重工業㈱及び石川島播磨重工業㈱の協力を得た。

また、本報告書を纏めるにあ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、ITER開発室 羽田一彦氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Hada K., et al., IAEA TECDOC-761, 124 (1994)
- (2) 羽田一彦 他, 原子力誌, 38, 834(1996)
- (3) 西原哲夫 他, 原子力誌, 41, 571(1999)
- (4) Hada K., et al., JAERI-conf 96-010 “Proc. of the 3rd JAERI Sympto. on HTGR Tech.”,229 (1996)
- (5) Tsuruoka K. et al., Trans. ISIJ, 23, 1091 (1983)
- (6) Singh J., et al., Nucl. Eng. Design, 78, 215 (984)
- (7) 羽田一彦 他, JAERI-tech 97-004 “アングル型高温隔離弁の概念と炉外実証試験計画”, (1997)
- (8) 日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室、他、JAERI-M 89-005”高温工学試験研究炉の高温構造設計方針”, (1989)
- (9) 渡辺勝利 他, 学振 123 委員会研究報告, 23, 275 (1982)
- (10) 新藤雅美 他, 鉄と鋼, 62, 1540 (1976)

Table 2.1 Specification for the isolation valve of the HTTR hydrogen production system

弁形式	内部断熱式アングル弁
機器区種別	高温ガス炉第3種弁
耐震クラス	As
作動流体	ヘリウム
作動流体の使用温度	905℃
作動流体の使用圧力	4.1MPa
作動流体の流量	9000kg/hr
耐用年数	20年
許容リーク量	10atm-cc/sec (目標値)
弁締切時間	30sec

Table 3.1 Comparison of features of the valve seat shape

形状	平面座	円錐座
締付力	平面を垂直に圧縮するため、大きな締付力が必要	くさび効果を利用するため、小さな締付力で十分
加工性	シート面の摺り合わせが容易	シート面の摺り合わせが難しい
弁座健全性	弁体が弁座に食い込むことはない	熱膨張などにより弁体が弁座に食い込む可能性がある

Table 3.2 Comparison of features of the seal mechanism

形式	グランドシール	ベローズシール
シール原理	弁棒とグランド部の隙間にシール材を詰め、リークを防ぐ	ベローズによりグランド部の隙間を覆い、密封する
材料	アスベスト、膨張黒鉛等の非金属	SUS、インコネル等の金属
構造	単純	複雑
性能	ベローズに比べやや劣る	完全密封
耐熱性	黒鉛系材料、無酸化雰囲気では 1650℃まで対応可能	材料の高温強度に依存
構造へのインパクト	特になし	バルブの高さが若干高くなる



Table 3.3 Comparison of features of the actuator

形式	電動式	エアシリンダー式
作動原理	電気モーターの回転力により弁棒を動かす 電源喪失時にも弁は駆動しない	シリンダーの空気圧力により弁棒を動かす 電源喪失時にフェイルセーフ機構により弁が駆動する可能性がある。
作動時間	モーターの性能によるため、エアシリンダー式よりは若干遅い	高速で作動
駆動速度	モーターの制御により調整が可能	調整は難しい
付帯設備	電源、制御装置	空気配管のみ
締付力	モーターの制御により締付力の設定が容易	シリンダー径と空気圧力により固定
耐震性へのインパクト	重量が比較的軽いため耐震上有利	重量が重いため耐震上不利

Table 3.5 Input data

	熱膨張による配管反力	自重	S2地震力(Y方向)
$F_x$ (kgf)	-6976.0	178.9	-566.7
$F_y$ (kgf)	6.32	148.7	1057.0
$F_z$ (kgf)	7395.3	168.5	668.5
$M_x$ ( $10^3$ kgfmm)	7453.3	169.4	850.5
$M_y$ ( $10^3$ kgfmm)	66.7	-259.2	-394.5
$M_z$ ( $10^3$ kgfmm)	1378.0	-58.6	833.3

Table 3.4 Input data

## 温度解析用材料特性

温度 °C	熱伝導率 (kcal/mh°C)			比熱 (kcal/kg°C)			比重量 (kg/m <sup>3</sup> )		
	ハステロイX	2.25Cr-1Mo	カオウール	ハステロイX	2.25Cr-1Mo	カオウール	ハステロイX	2.25Cr-1Mo	カオウール
50	8.445	31.38		0.1163	0.1092		8230	7850	220
100	9.482	31.73		0.1170	0.1139		8230	7850	220
150	10.44	31.99		0.1169	0.1189		8230	7850	220
200	11.24	31.99		0.1181	0.1233		8230	7850	220
250	12.04	31.89		0.1174	0.1284		8230	7850	220
300	12.84	31.56	0.355	0.1185	0.1334	0.209	8230	7850	220
350	13.65	31.03		0.1208	0.1383		8230	7850	220
400	14.60	30.48	0.385	0.1235	0.1441	0.218	8230	7850	220
450	15.41	29.81		0.1264	0.1509		8230	7850	220
500	16.21	29.03	0.425	0.1302	0.1585	0.222	8230	7850	220
550	17.16			0.1330			8230	7850	220
600	17.97		0.470	0.1364		0.227	8230	7850	220
650	18.77			0.1390			8230	7850	220
700	19.57		0.520	0.1454		0.233	8230	7850	220
750	20.52			0.1520			8230	7850	220
800	21.33		0.575	0.1584		0.238	8230	7850	220
850	22.13			0.1647			8230	7850	220
900	22.94		0.635	0.1713		0.243	8230	7850	220

## 応力解析用材料特性

温度 °C	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )		ポアソン比		線膨張係数 (/°C)	
	ハステロイX	2.25Cr-1Mo	ハステロイX	2.25Cr-1Mo	ハステロイX	2.25Cr-1Mo
20	19900	21000	0.3	0.3	8.4X10 <sup>-6</sup>	12.10X10 <sup>-6</sup>
100	19300	20700	0.3	0.3	8.4X10 <sup>-6</sup>	12.10X10 <sup>-6</sup>
150	18900	20400	0.3	0.3	9.4X10 <sup>-6</sup>	12.43X10 <sup>-6</sup>
200	18600	20100	0.3	0.3	10.4X10 <sup>-6</sup>	12.70X10 <sup>-6</sup>
250	18200	19800	0.3	0.3	11.4X10 <sup>-6</sup>	12.96X10 <sup>-6</sup>
300	17800	19400	0.3	0.3	12.2X10 <sup>-6</sup>	13.21X10 <sup>-6</sup>
350	17400	18900	0.3	0.3	13.0X10 <sup>-6</sup>	13.42X10 <sup>-6</sup>
400	17100	18500	0.3	0.3	13.7X10 <sup>-6</sup>	13.61X10 <sup>-6</sup>
450	16700	18300	0.3	0.3	14.3X10 <sup>-6</sup>	13.81X10 <sup>-6</sup>
500	16400	17800	0.3	0.3	14.8X10 <sup>-6</sup>	13.97X10 <sup>-6</sup>
550	16000	17200	0.3	0.3	15.2X10 <sup>-6</sup>	14.11X10 <sup>-6</sup>
600	15600		0.3		15.5X10 <sup>-6</sup>	
650	15300		0.3		15.8X10 <sup>-6</sup>	
700	14900		0.3		16.0X10 <sup>-6</sup>	
750	14500		0.3		16.2X10 <sup>-6</sup>	
800	14200		0.3		16.4X10 <sup>-6</sup>	
850	13800		0.3		16.5X10 <sup>-6</sup>	
900	13400		0.3		16.8X10 <sup>-6</sup>	
950	13100		0.3		17.1X10 <sup>-6</sup>	
1000	12700		0.3		17.6X10 <sup>-6</sup>	

Table 3.6 Result of stress evaluation

(a) normal operational condition

材料	評価位置	温度 (°C)		1 次応力の制限				1 次+2 次応力の制限				クリープ疲労損傷の制限				
		max	min	$P_m$	許容値 [ $S_m$ , $S_t$ ] <sub>min</sub>	判定	$P_L+P_B$	許容値 [1.27 $S_m$ , $K_t S_t$ ] <sub>min</sub>	判定	( $P_L+P_B+Q$ ) <sub>R</sub>	許容値 $S_a$	判定	Df	Dc	Df+Dc	判定
ハステロイ X	A	899	60	0.006	0.4	○	0.006	0.5	○	10.97	24.9	○	3.3E-4	4.1E-2	4.13E-2	○
	B	833	60	0.07	0.9	○	0.030	1.1	○	11.56	25.3	○	8.6E-4	3.1E-2	3.19E-2	○
2.25Cr-1Mo	C	333	60	2.26	12.4	○	2.83	18.6	○	25.43	37.2	○	6.0E-3	0.0	6.0ER-3	○

(b) accident condition

材料	評価位置	温度 (°C)		1 次応力の制限				1 次+2 次応力の制限				クリープ疲労損傷の制限				
		max	min	$P_m$	許容値 [1.2 $S_m$ , $S_t$ ] <sub>min</sub>	判定	$P_L+P_B$	許容値 [1.5 $S_m$ , $K_t S_t$ ] <sub>min</sub>	判定	( $P_L+P_B+Q$ ) <sub>R</sub>	許容値 $S_a$	判定	Df	Dc	Df+Dc	判定
ハステロイ X	A	923	40	5.85	6.8	○	6.33	10.2	○	6.91	24.8	○	2.1E-4	0.32	0.33	○
	B	845	40	1.37	9.8	○	2.36	14.7	○	11.57	25.2	○	1.8E-3	3.4E-2	3.62E-2	○
2.25Cr-1Mo	C	333	40	2.46	12.4	○	3.14	18.6	○	28.04	37.2	○	7.0E-3	0.0	7.0ER-3	○

$P_m, S_m, S_t, P_L, P_B, Q, S_a$  の単位は kg/mm<sup>2</sup>

Table 4.1 Results of survey for the practical valves

材質	使用温度 (°C)	使用圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	流体	適用箇所	施工厚さ (mm)
ステライト#21	1200~1815 (*1)	100	高温圧力/LPG燃焼ガス	弁座	2
ステライト#6	1200~1815 (*1)	100	高温圧力/LPG燃焼ガス	弁体	2
	500~700	100以上	液体金属ナトリウム		
	650	9	水素	弁体及び弁座	2
	650(*2)	1	アンモニア		
	690(*2)	0.07	排ガス		
	670~700(*2)	6.5	蒸気他		
670~700(*2)	6.5	アノードガス	2		
TCW	1050	45	Heガス	弁体及び弁座	2~3
コーティング	900	14	石炭燃焼ガス (灰含む)	弁体及び弁座	1.5
	850	10	酸化鉄 +N <sub>2</sub> ガス		

(\*1) 通常閉状態で、高温時に開となる弁である。

(\*2) 高温試験 (条件: 7.2kgf/cm<sup>2</sup>, 700°C N<sub>2</sub>ガス) ではシートリークなし。

Table 4.2 Chemical Composition

	Stellite No.1016		Stellite No.6		MAR-M 247		SA-52	
化 学 組 成  (wt%)	C	2.5	C	1	C	0.15	C	0.05
					Ni	Bal(59)	Ni	Bal(57)
	Cr	32	Cr	28	Cr	8.25	Cr	19
	Co	Bal(45.5)	Co	Bal(64)	Co	10	Co	12
					Mo	0.7	Mo	6
	Fe	<3	Fe	<3	Fe	0.5		
					Al	5.5	Al	2
					B	0.015	B	0.005
					Ti	1	Ti	3
	W	17	W	4	W	10	W	1
					Zr	0.05		
					Other	1.5Hf,3Ta		

Table 4.3 Results of Vickers Hardness Test at 900°C [MHV 1kgf]

	時効処理前	時効処理後
MM247	299	242
SA52	165	151
Hastelloy XR	68	77

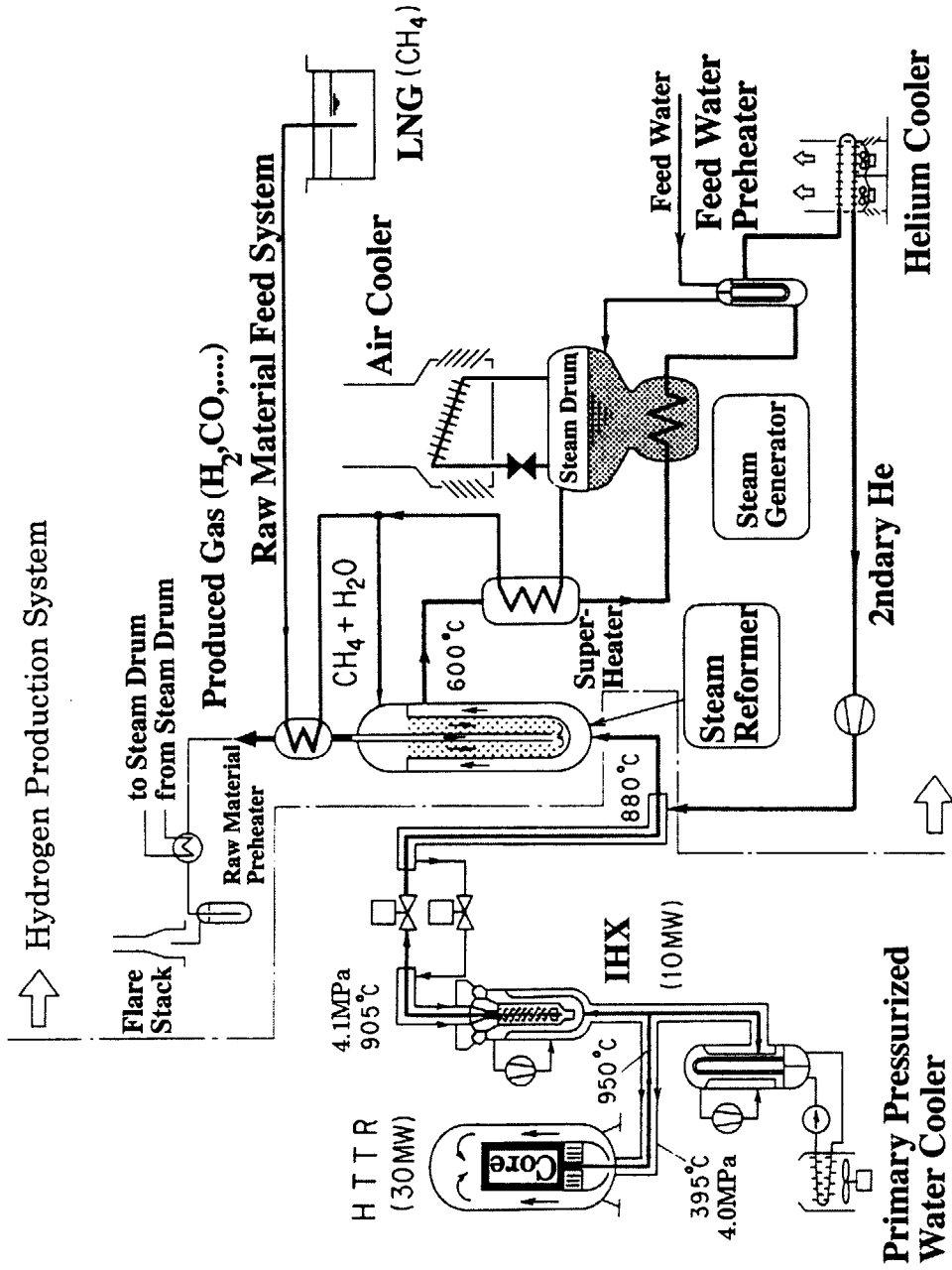


Fig. 1.1 Flow scheme of the HTTR hydrogen production system

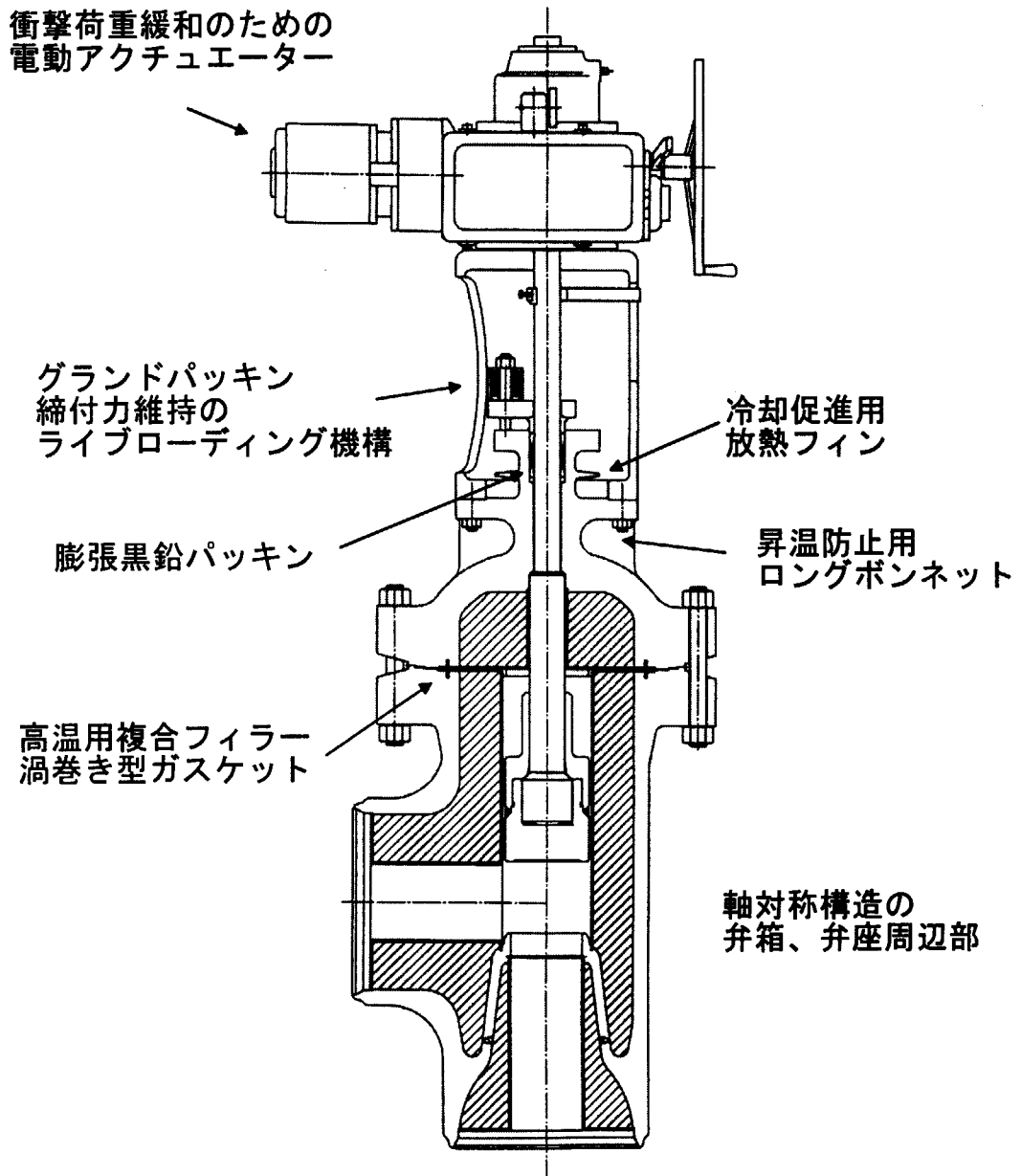


Fig. 3.1 High temperature isolation valve

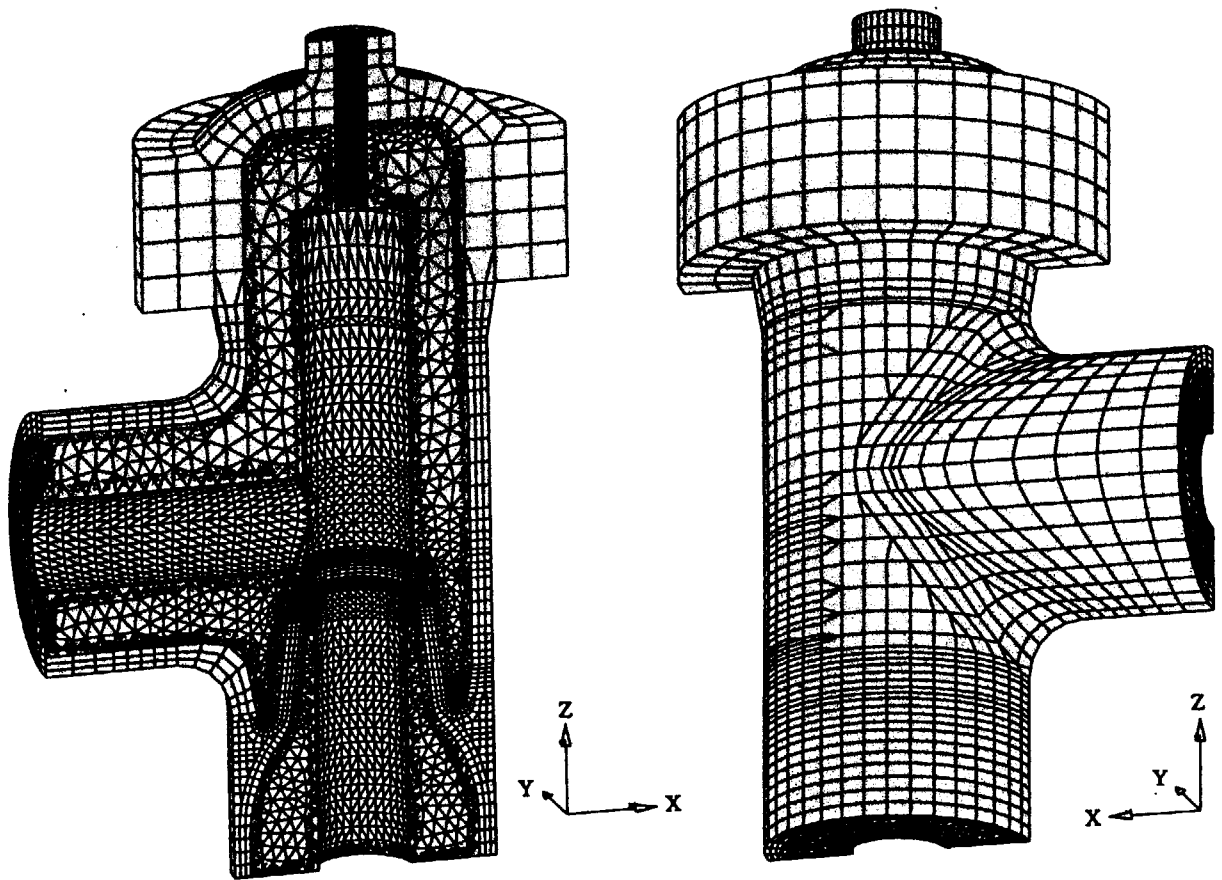


Fig. 3.2 3D FEM model for thermal analysis



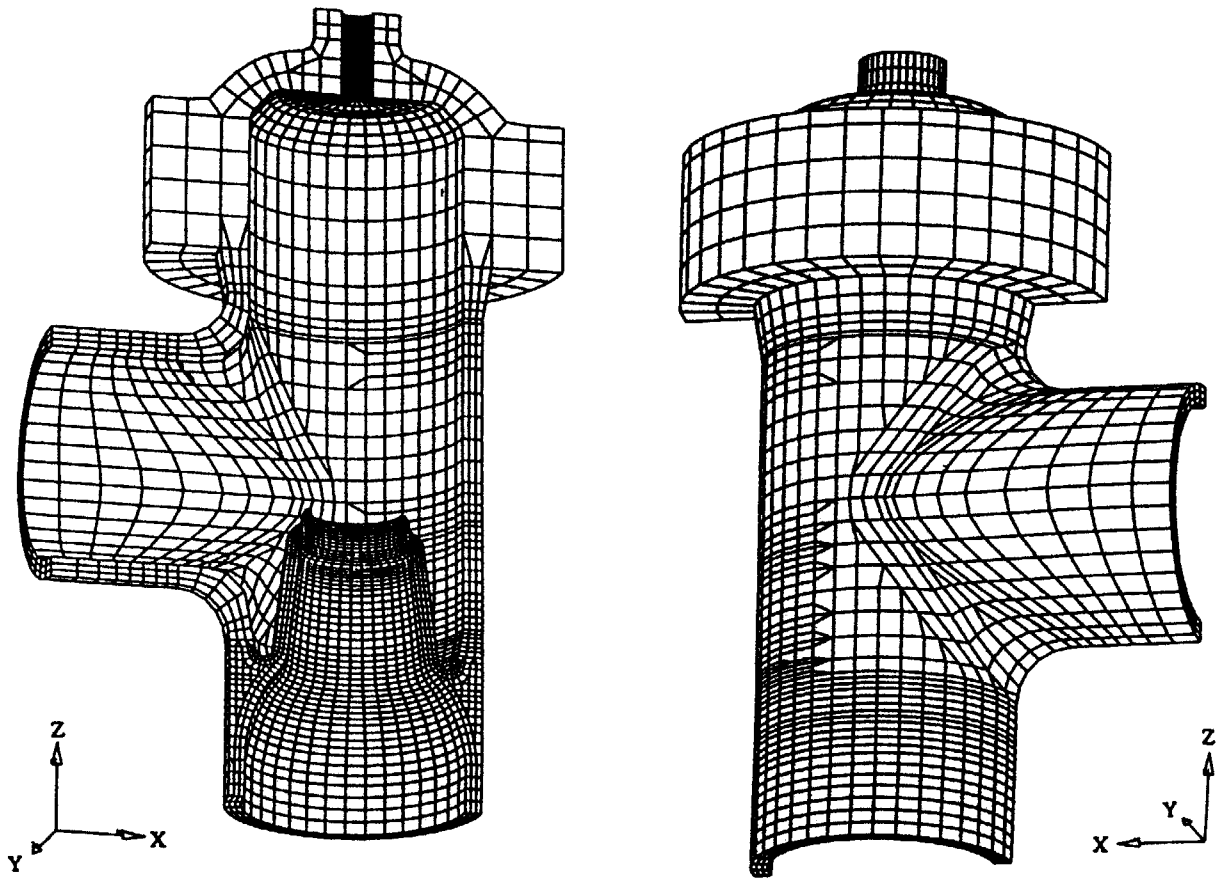


Fig. 3.3 3D FEM model for stress analysis

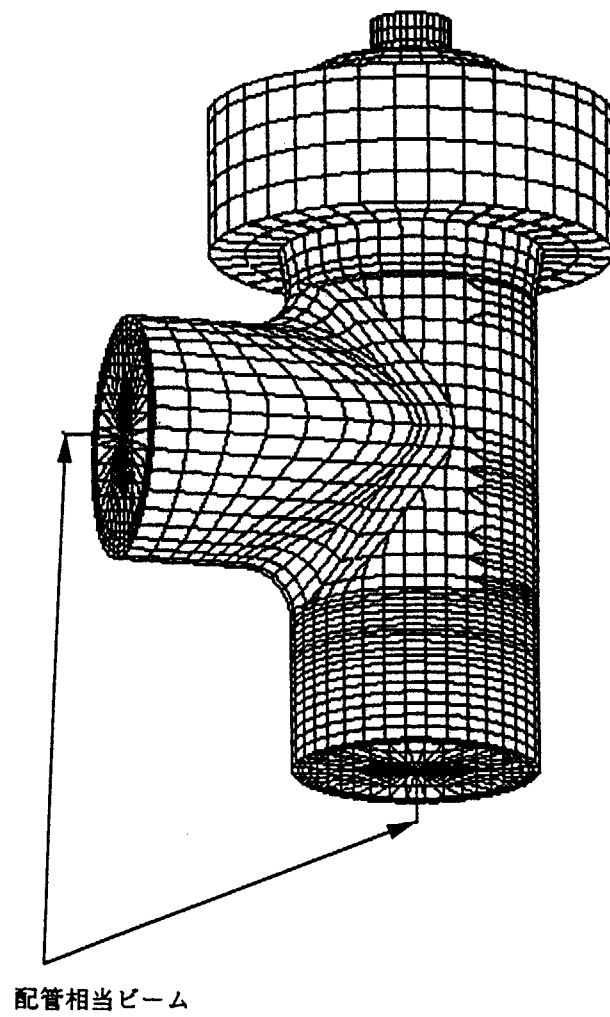


Fig. 3.4 3D FEM model for pipe reflection

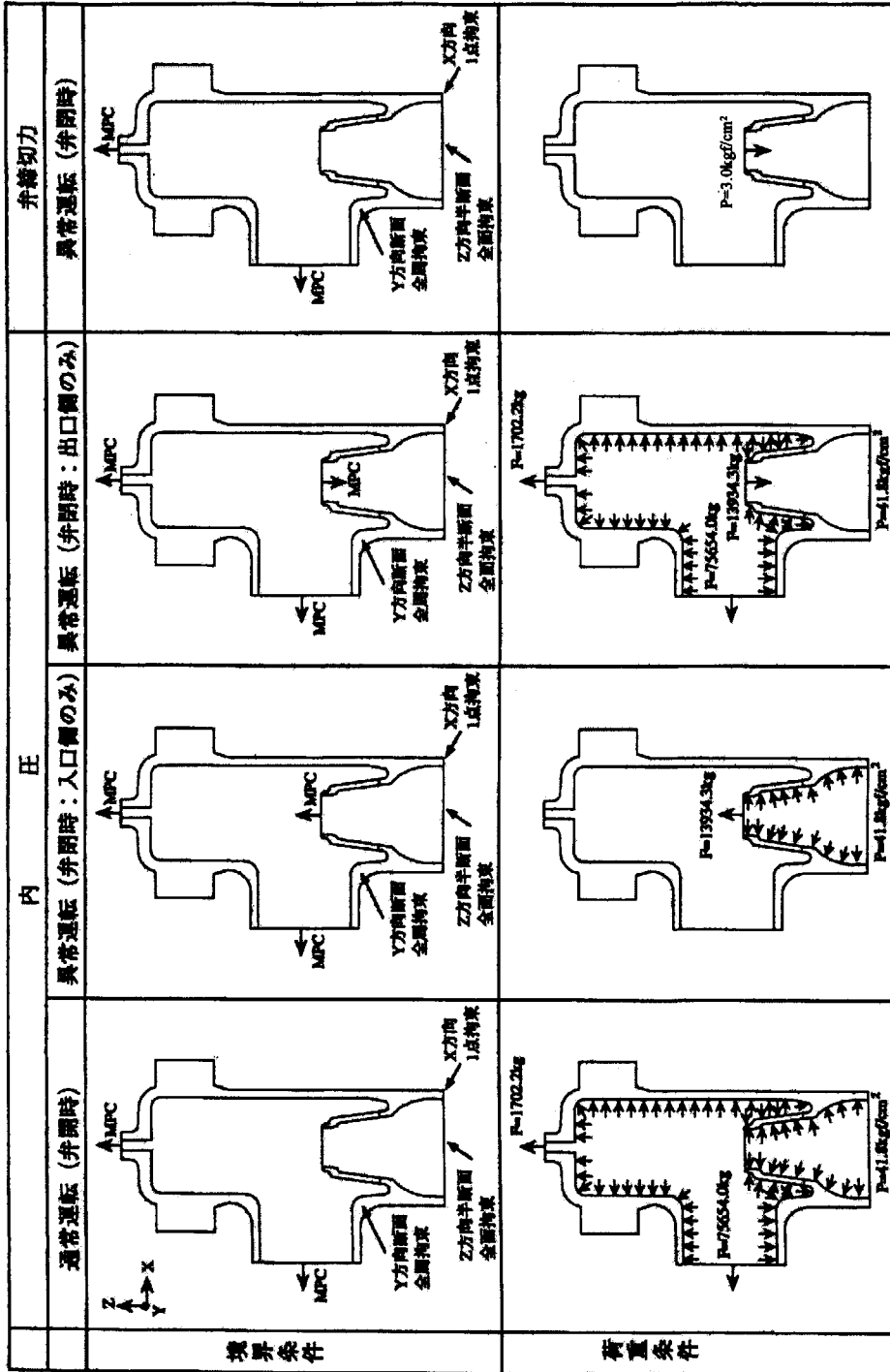
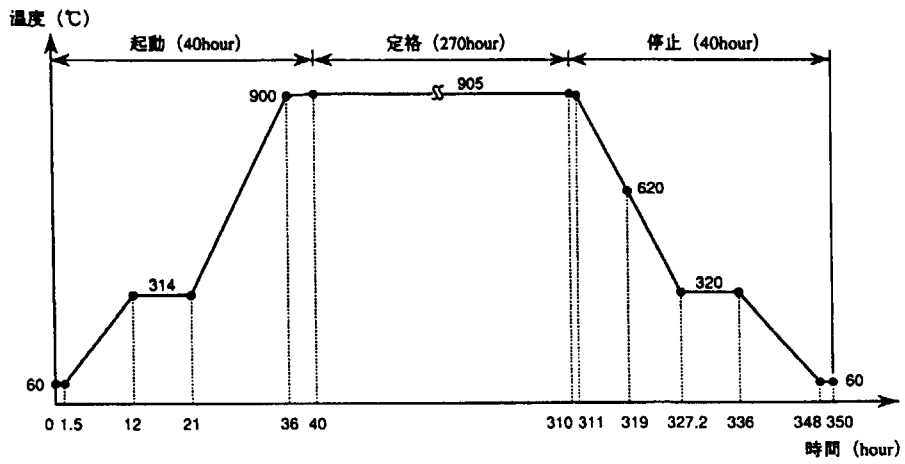
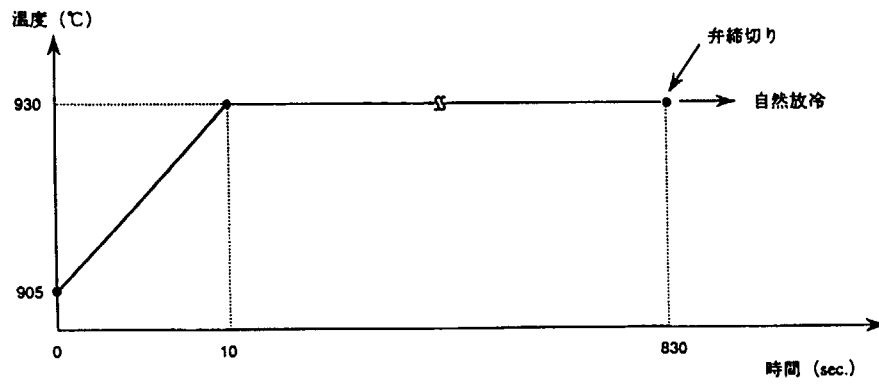


Fig. 3.5 Analysis conditions for internal pressure and shut off loading



(a) 通常運転/定格/停止



(b) 異常・事故時

Fig. 3.6 Thermal transient for the analysis

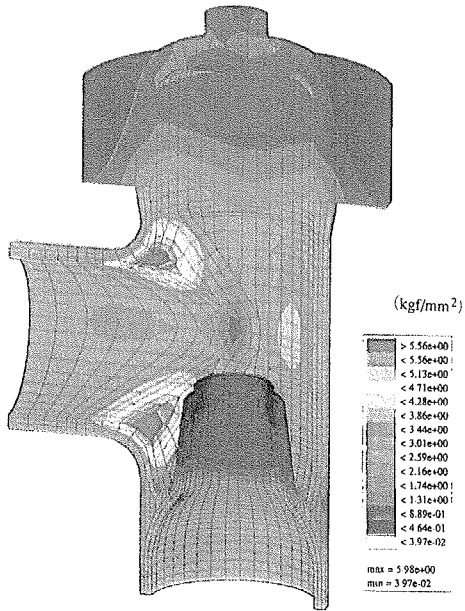


Fig. 3.7 Stress profile for pressure in full open

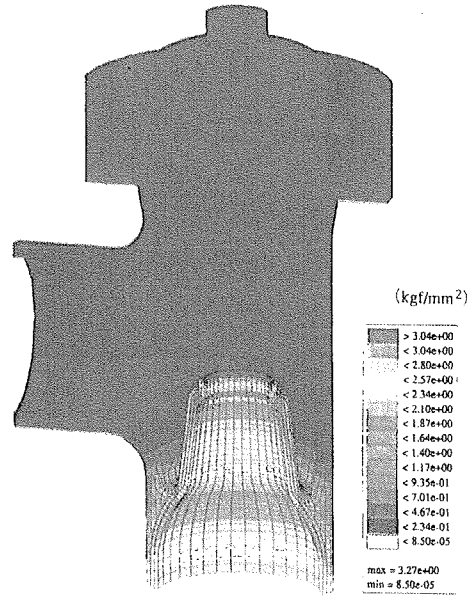


Fig. 3.8 Stress profile for pressure in close

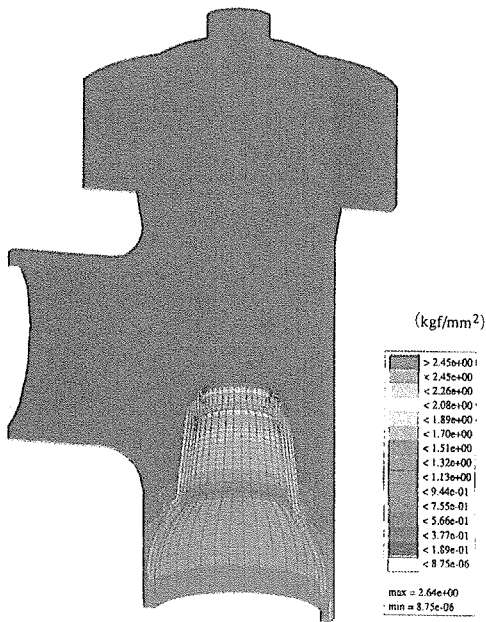


Fig. 3.9 Stress profile for valve shutting load

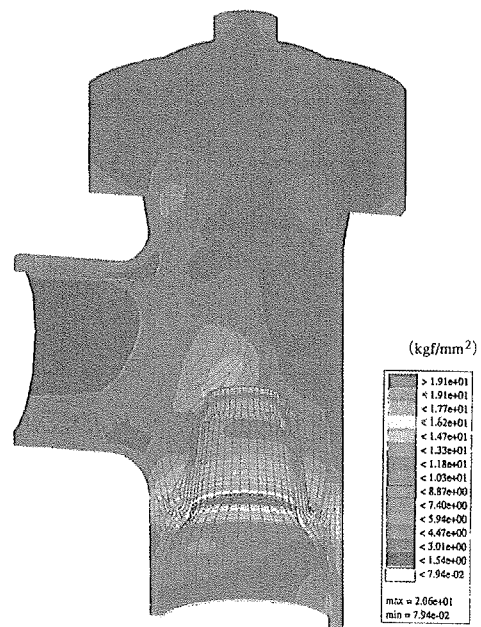


Fig. 3.10 Stress profile for thermal transient in normal operation

This is a blank page.

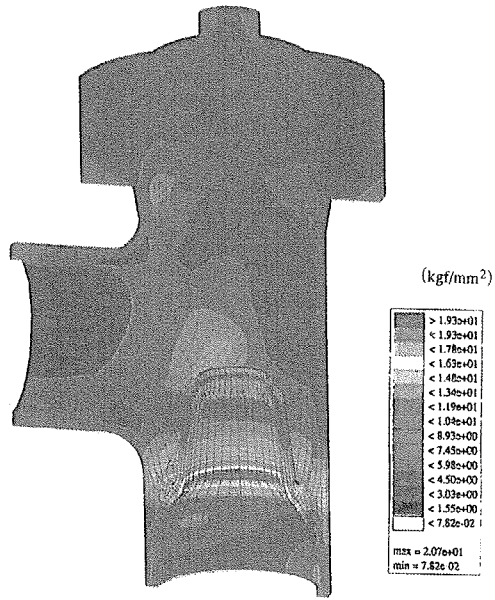


Fig. 3.11 Stress profile for thermal transient at accident

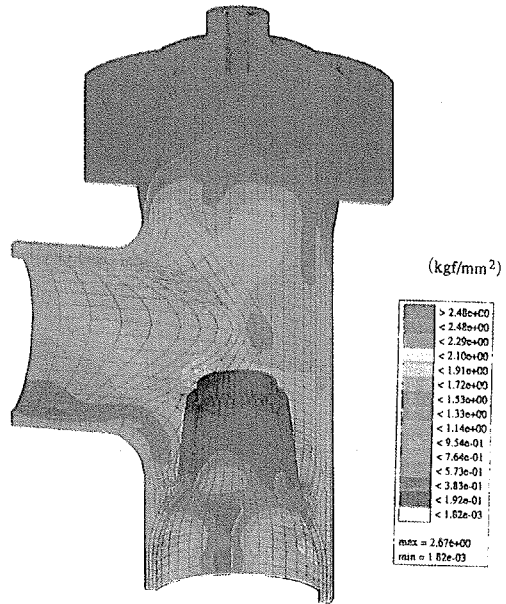


Fig. 3.12 Stress profile for thermal expansion of piping

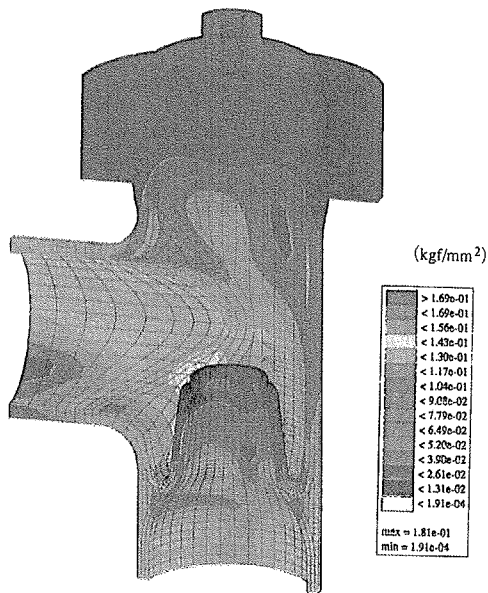


Fig. 3.13 Stress profile for gravity

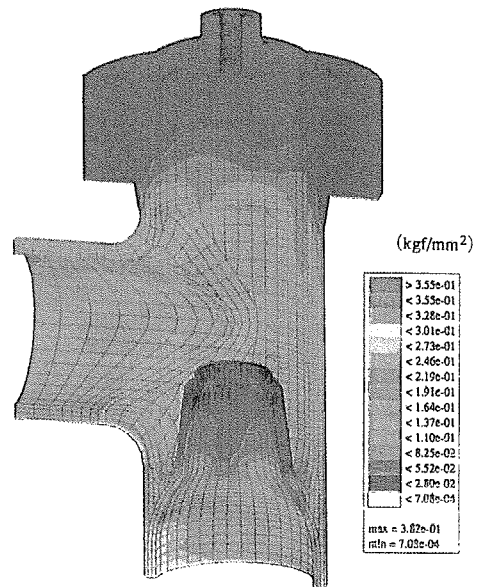


Fig. 3.14 Stress profile for seismic load

This is a blank page.



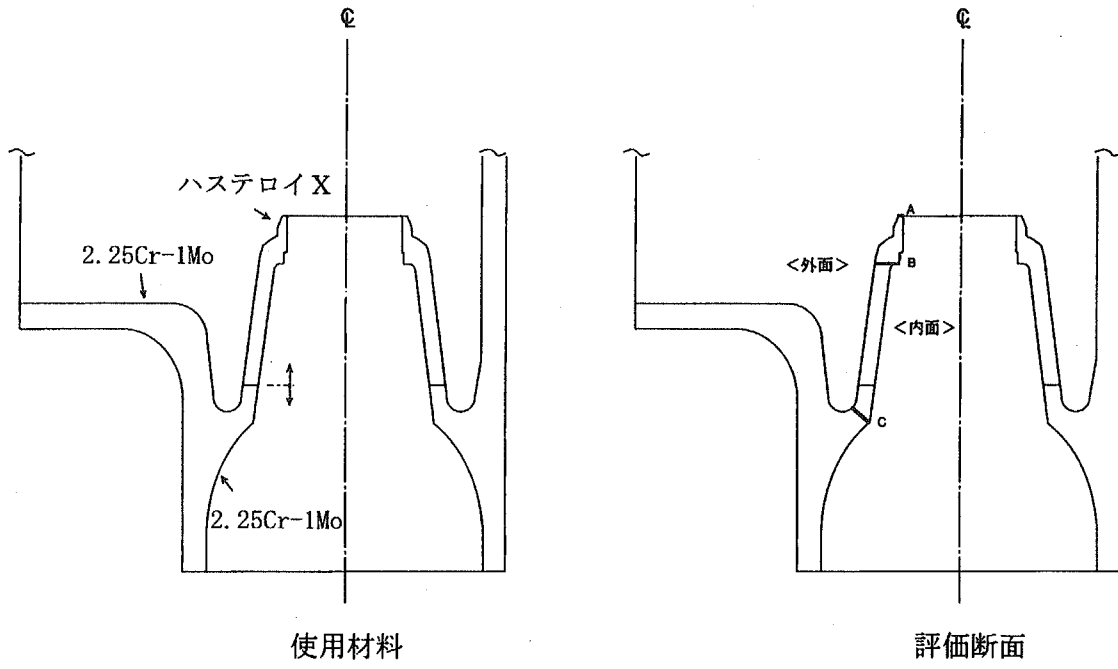
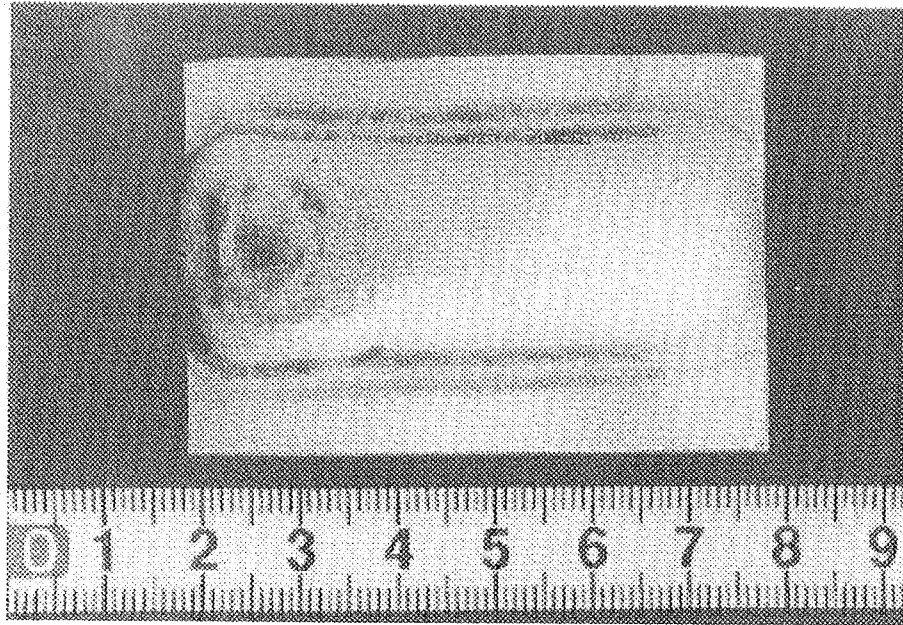
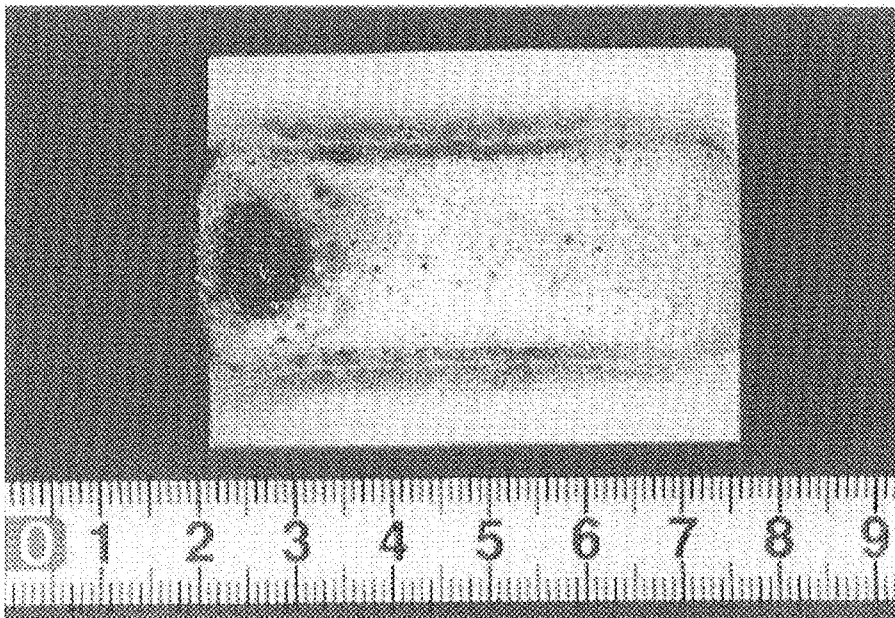


Fig. 3.15 Evaluation locations



ステライト 1016



ステライト複合材料

Fig.4.1 Results of liquid penetrate testing (stellite alloys)

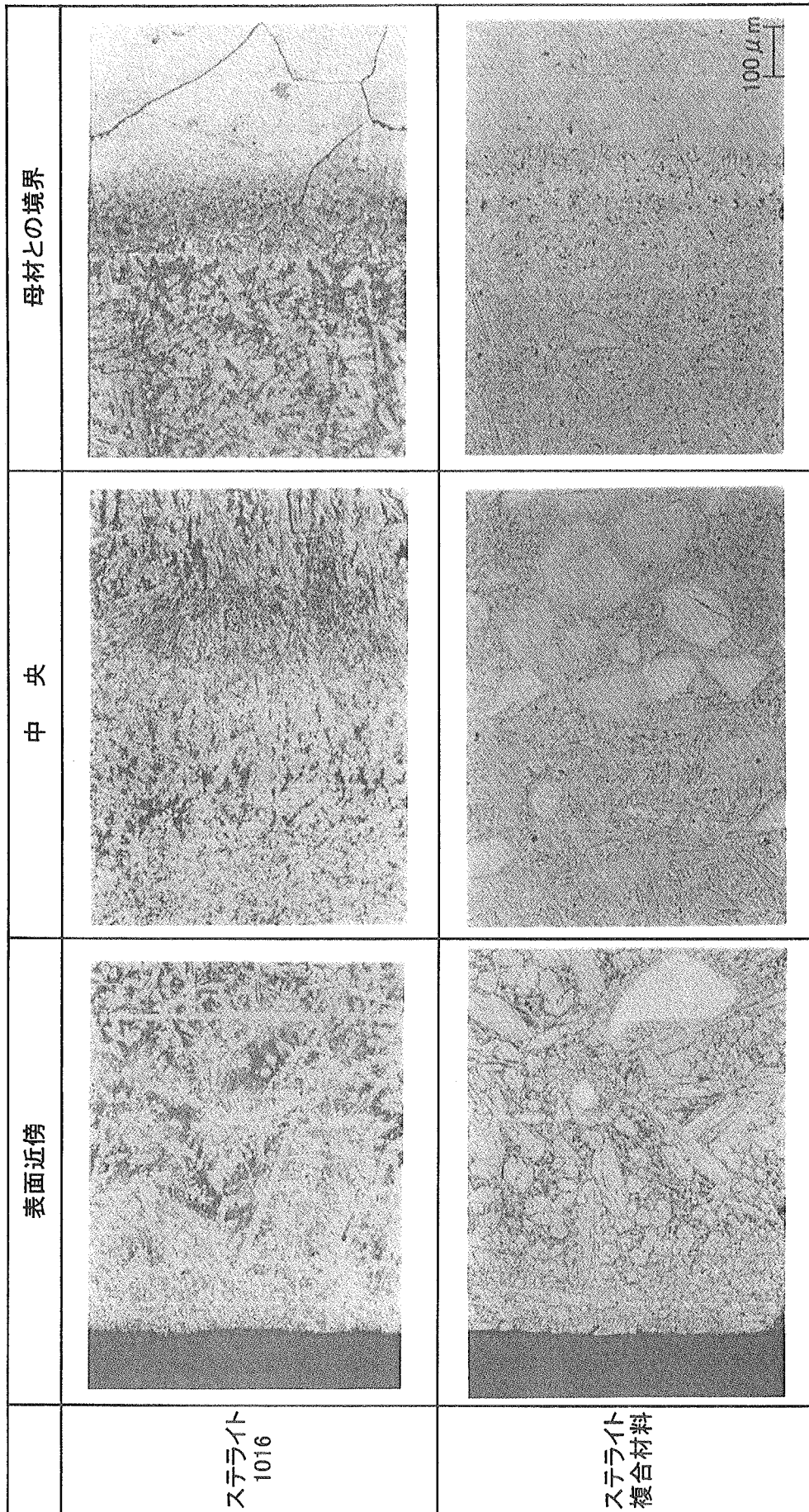


Fig.4.2 Cross Section of Specimens (Stellite Alloy)

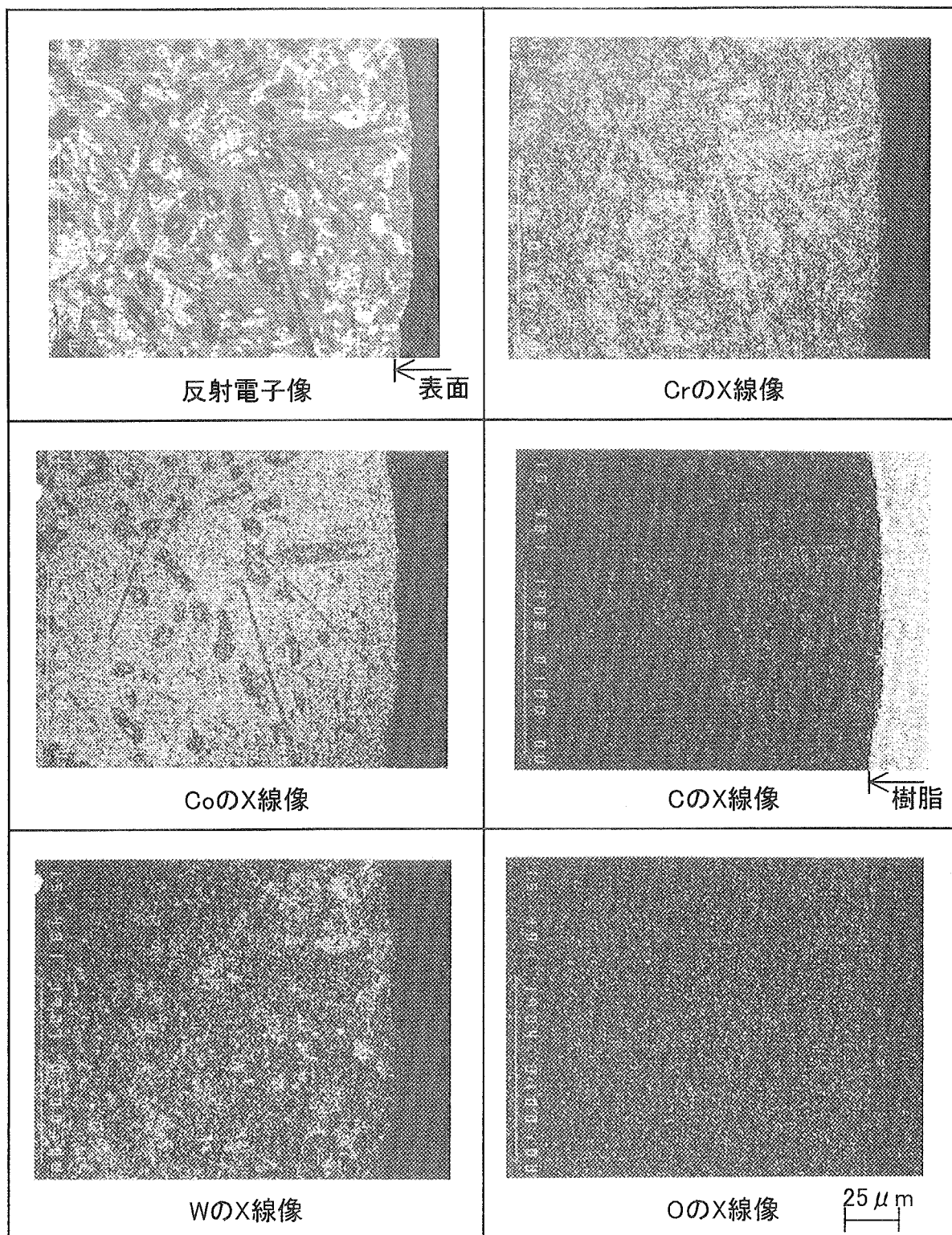


Fig.4.3 Result of EPMA (Stellite No.1016)



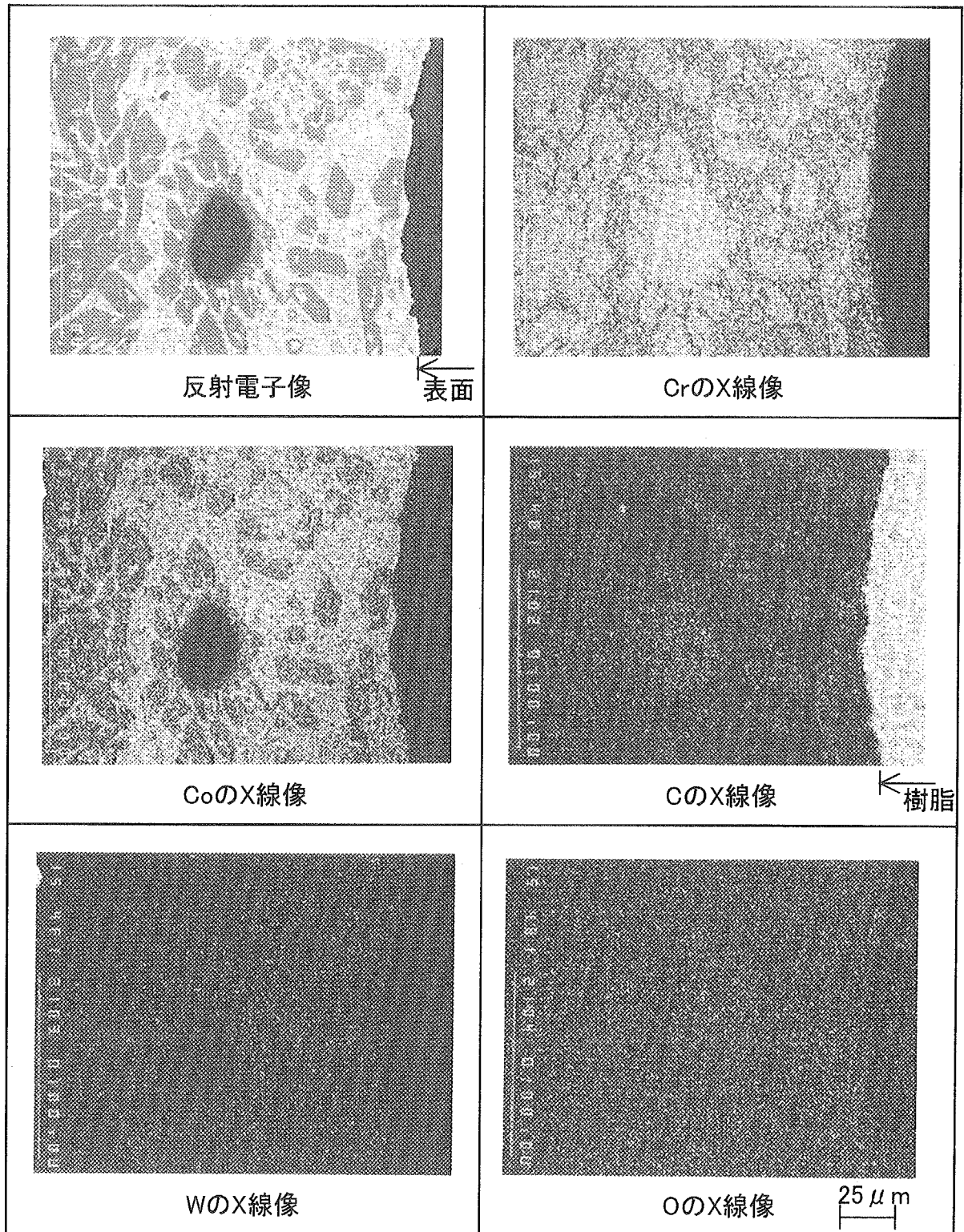


Fig.4.4 Result of EPMA (Stellite No.6 + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)

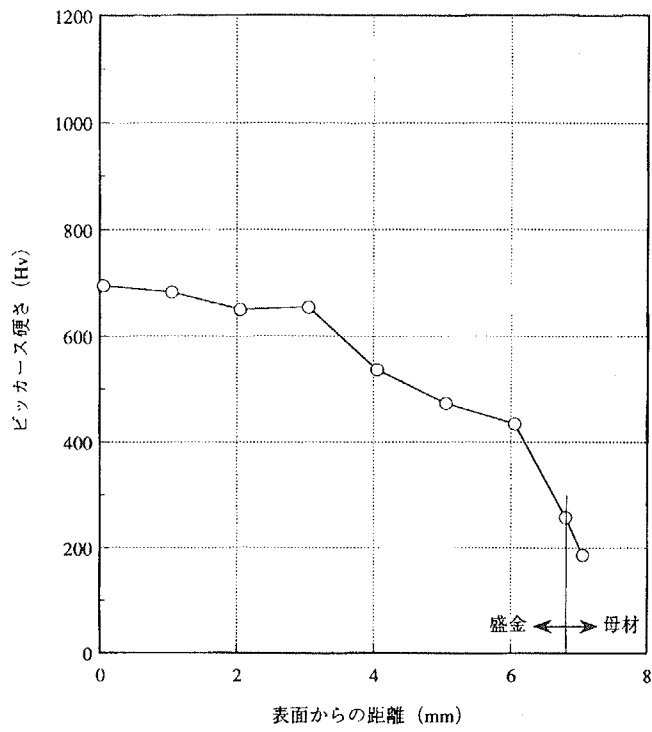


Fig.4.5 Result of Vickers Hardness Test (Stellite No.1016)

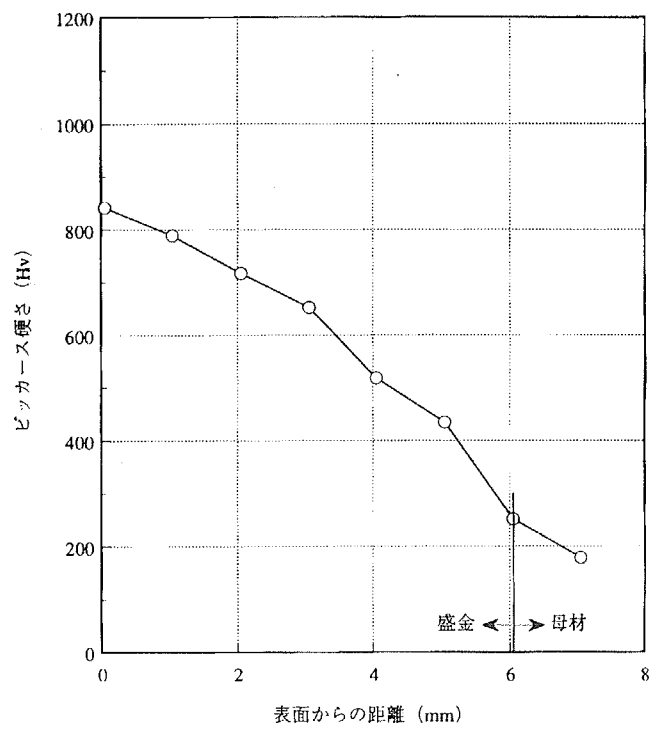


Fig.4.6 Result of Vickers Hardness Test (Stellite No.6 + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)

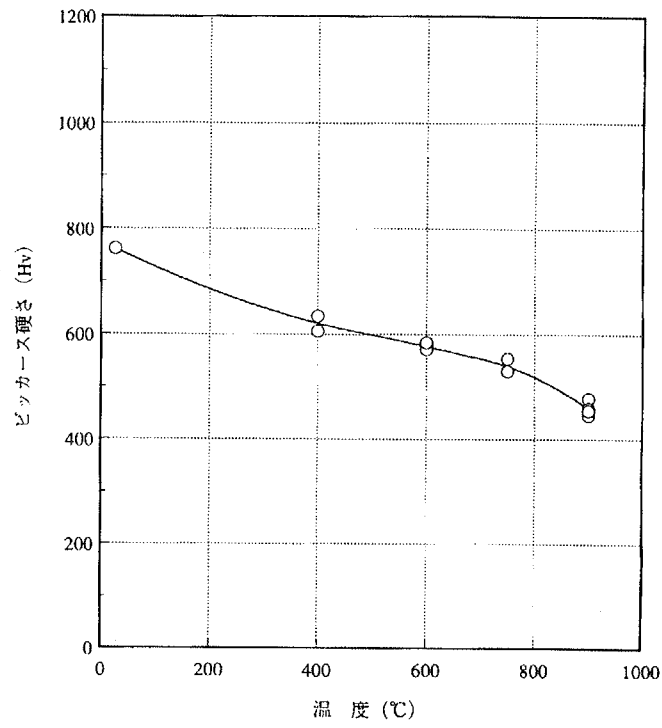


Fig.4.7 Result of Vickers Hardness Test (Stellite No.1016)

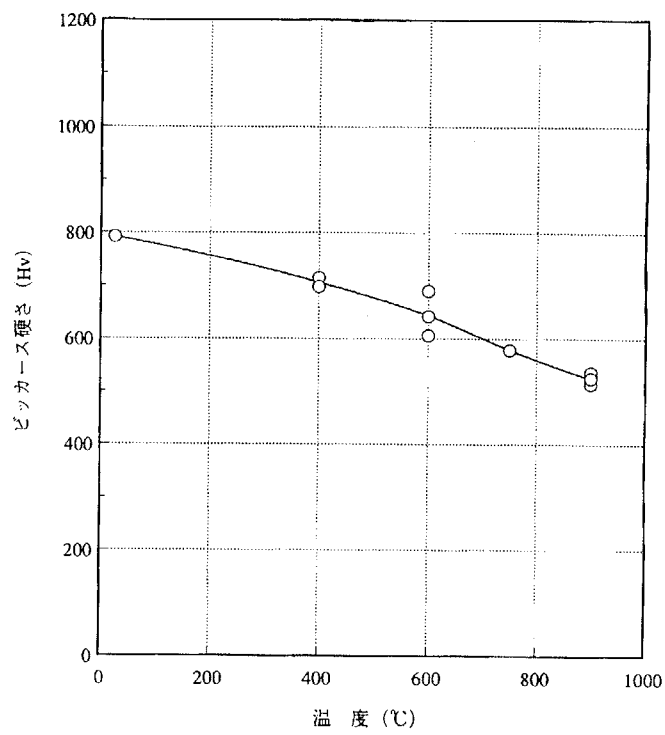


Fig.4.8 Result of Vickers Hardness Test (Stellite No.6 + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)


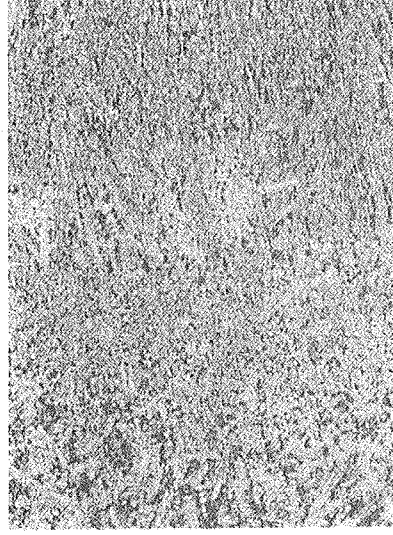
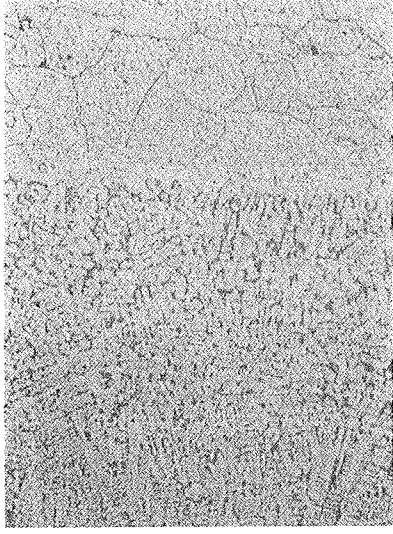


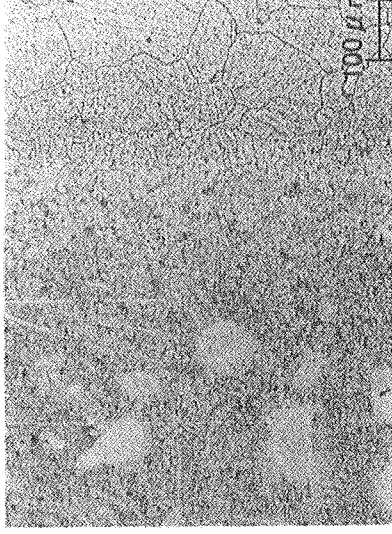
	表面近傍	中央	母材との境界
ステラライト 1016			
ステラライト 複合材料			

Fig.4.9 Cross Section of Specimens after 900°C × 200h (Stellite Alloy)



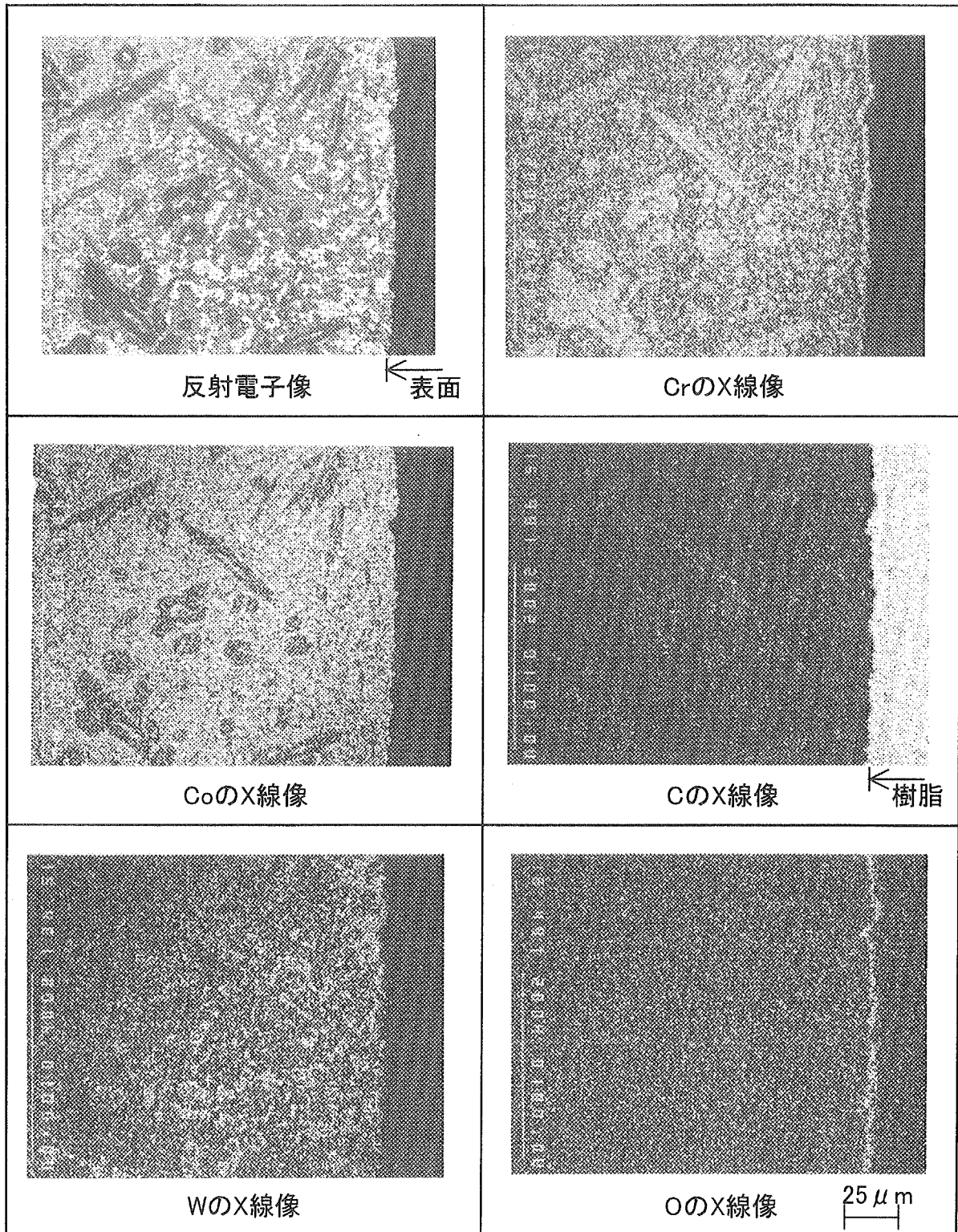


Fig.4.10 Result of EPMA after 900°C × 200h (Stellite No.1016)

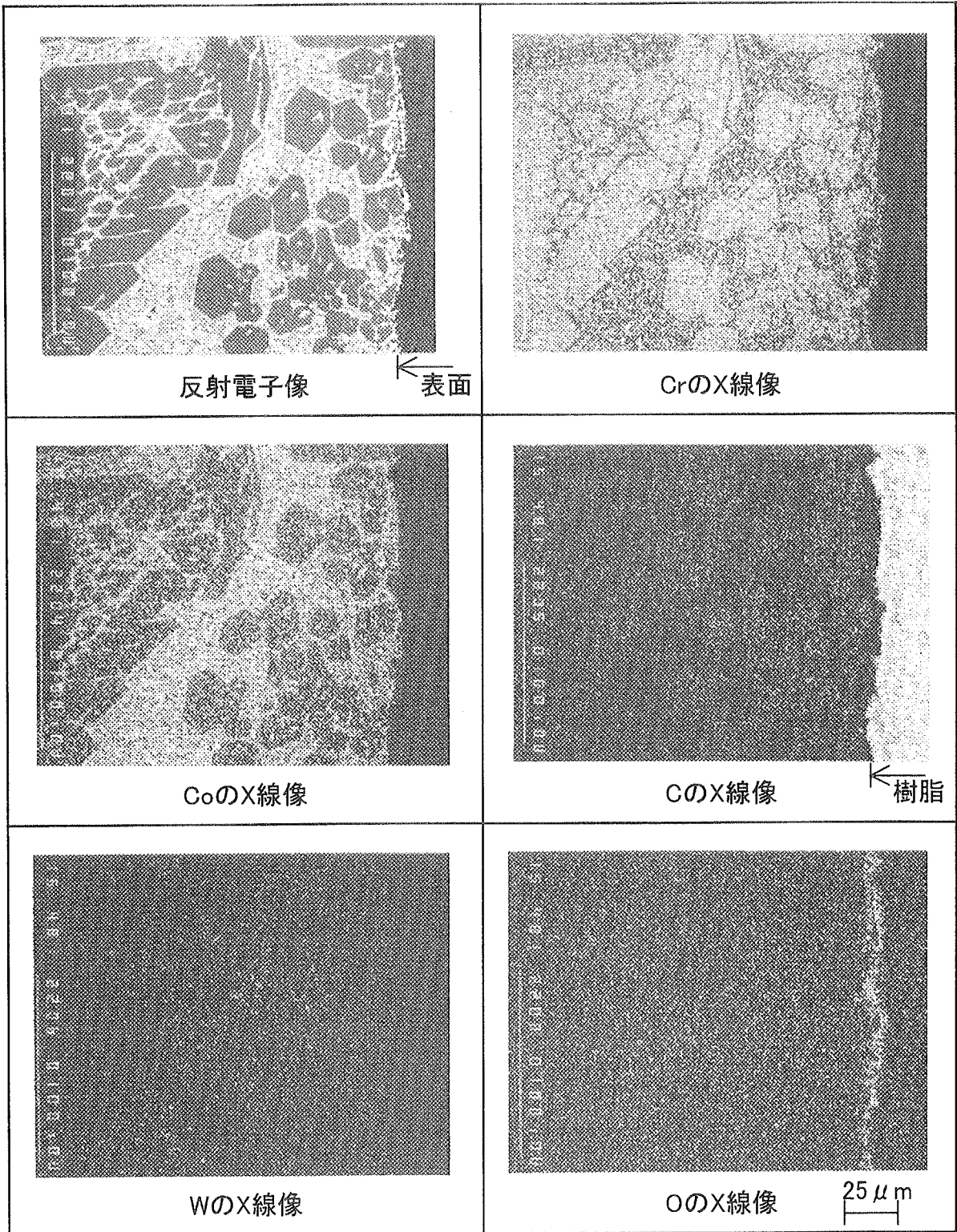


Fig.4.11 Result of EPMA after 900°C × 200h (Stellite No.6 + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)

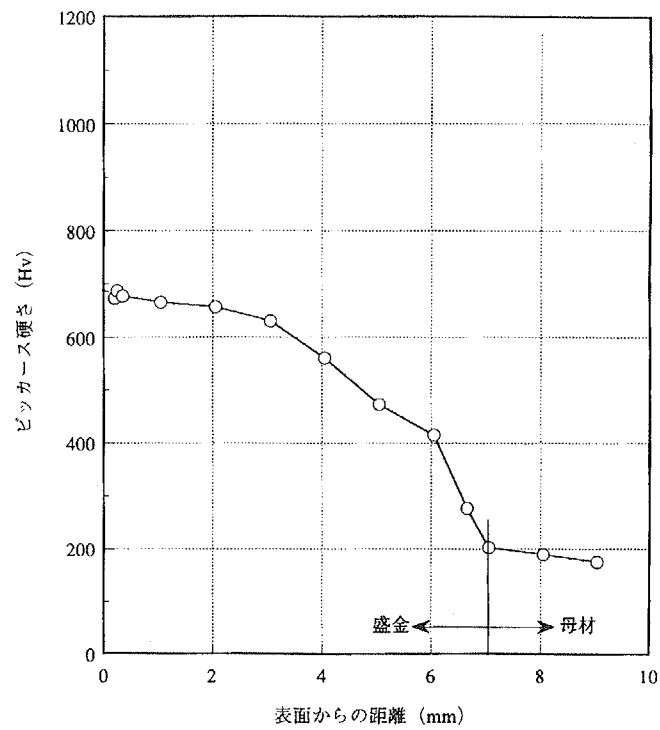


Fig.4.12 Result of Vickers Hardness Test after 900°C × 200h (Stellite No.1016)

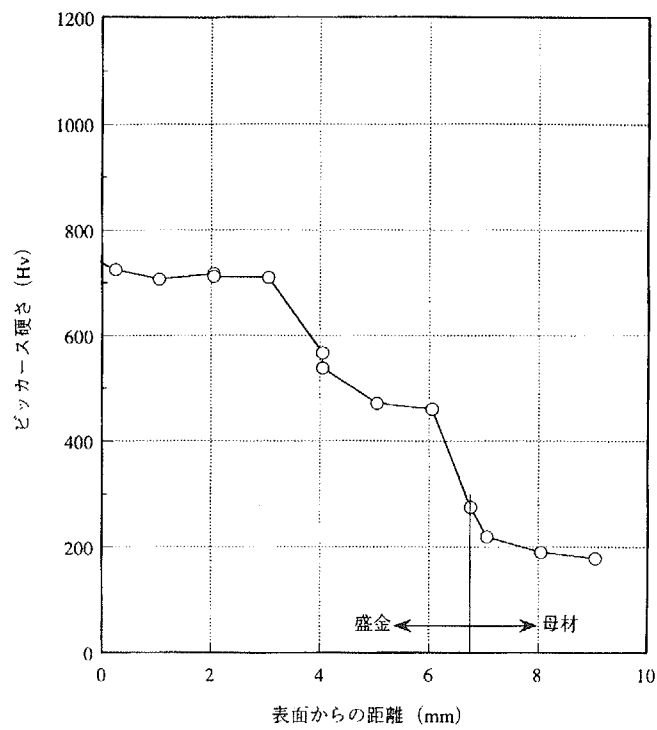
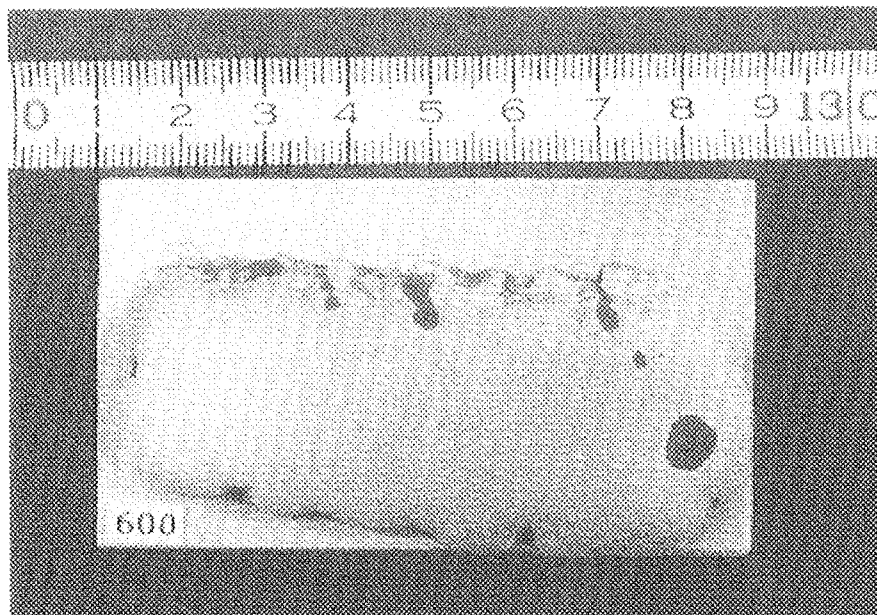
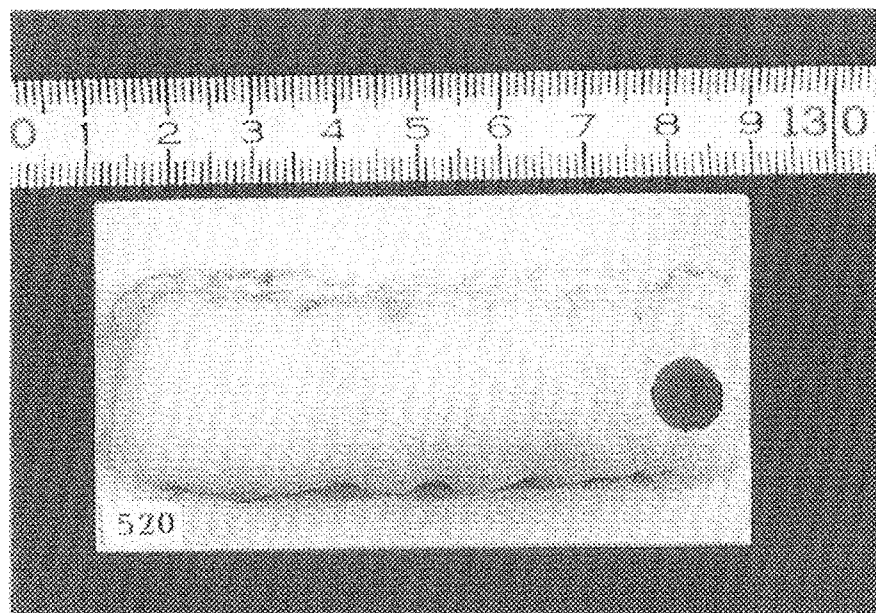


Fig.4.13 Result of Vickers Hardness Test after 900°C × 200h (Stellite No.6 + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)



MM247



SA52

Fig.4.14 Results of liquid penetrate testing (Ni alloys)

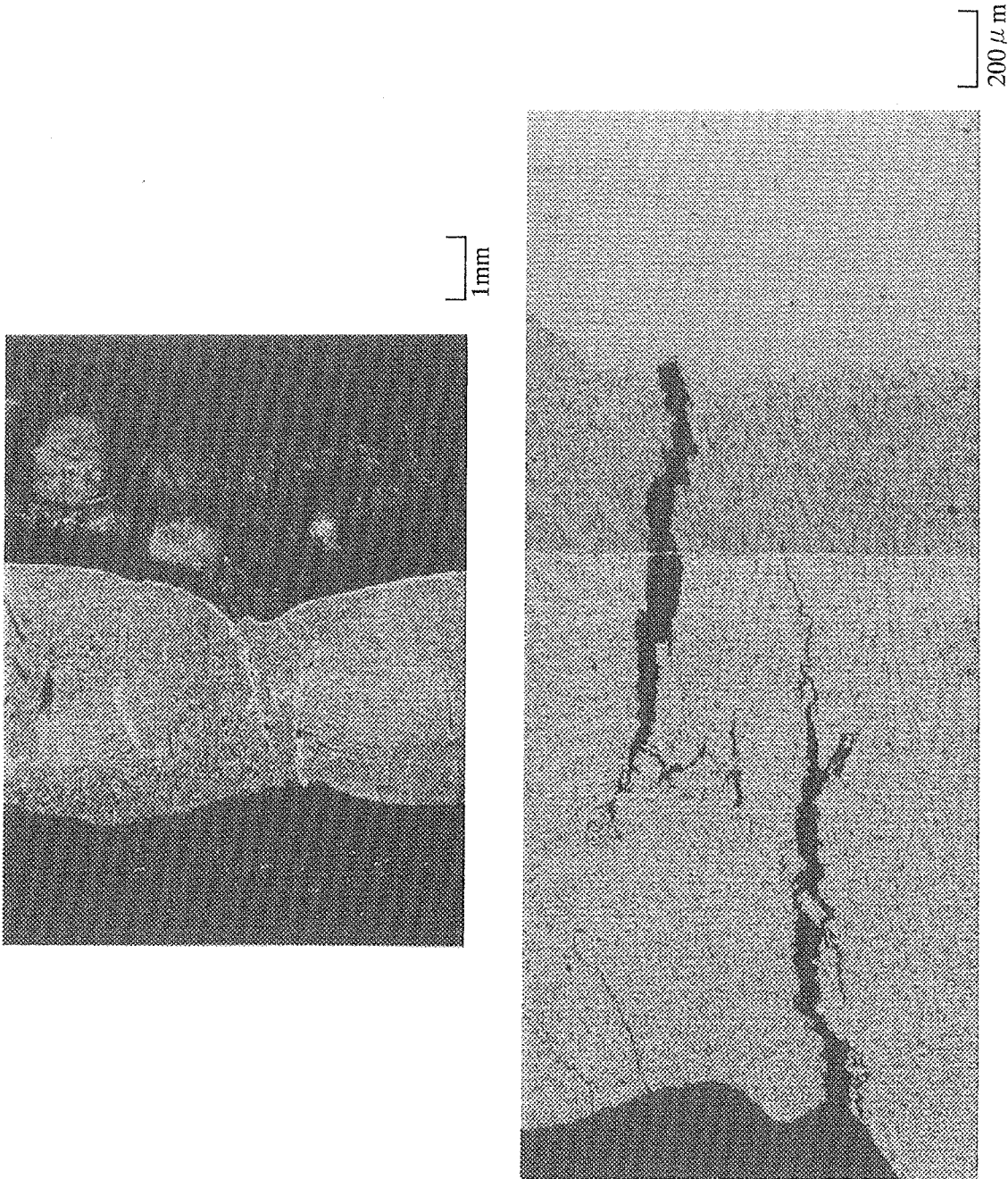
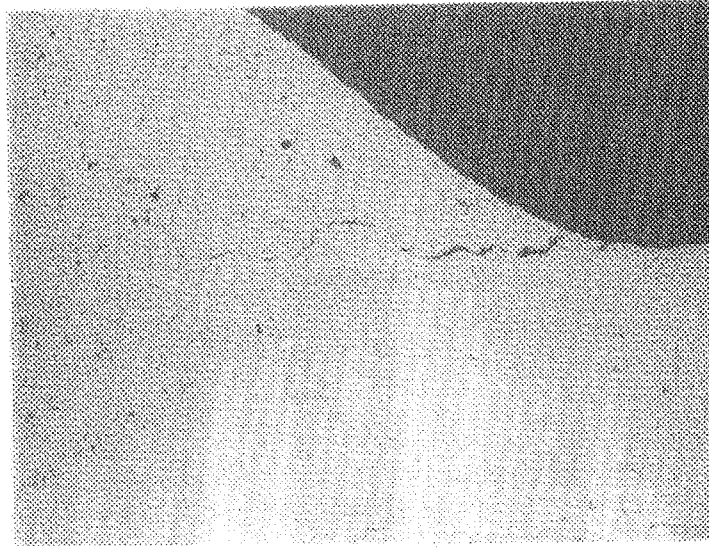
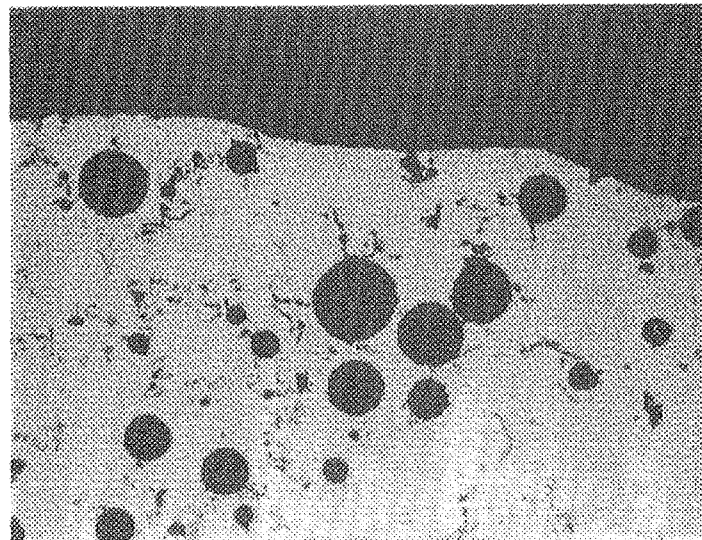


Fig.4.15 Crack section of MM247 alloy





クラック



ブローホール

200  $\mu$ m

Fig.4.16 Defects of SA52

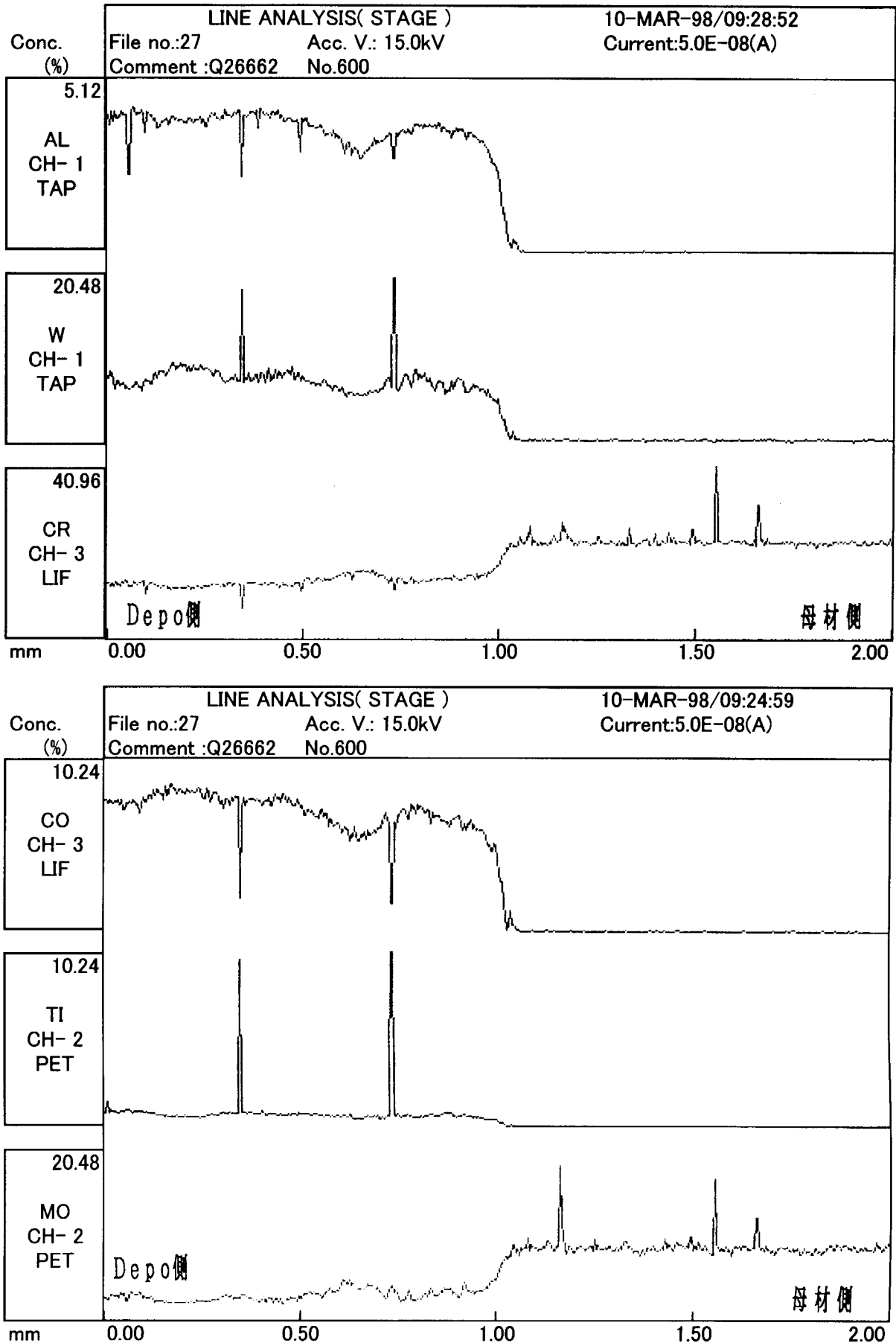


Fig.4.17 Element profiles of interface (MM247)

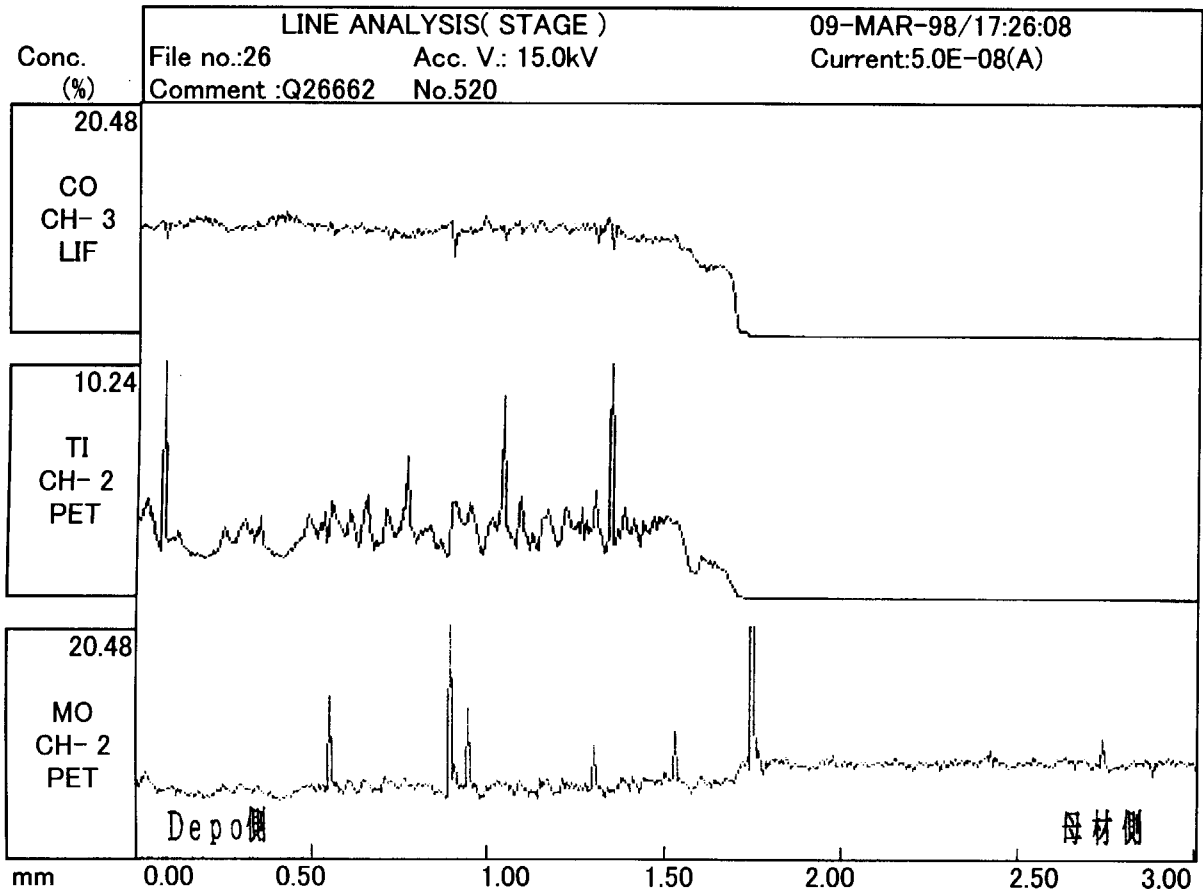
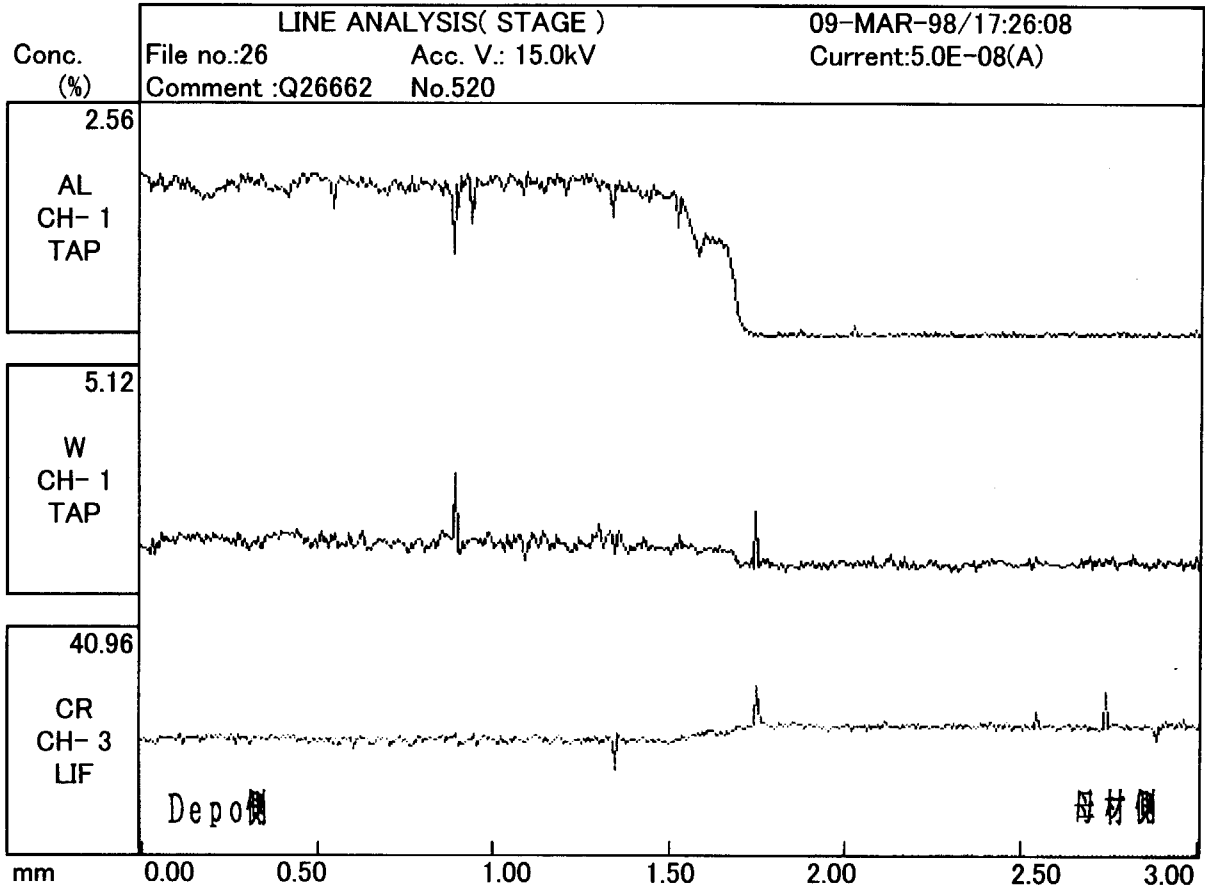


Fig.4.18 Element profiles of interface (SA52)



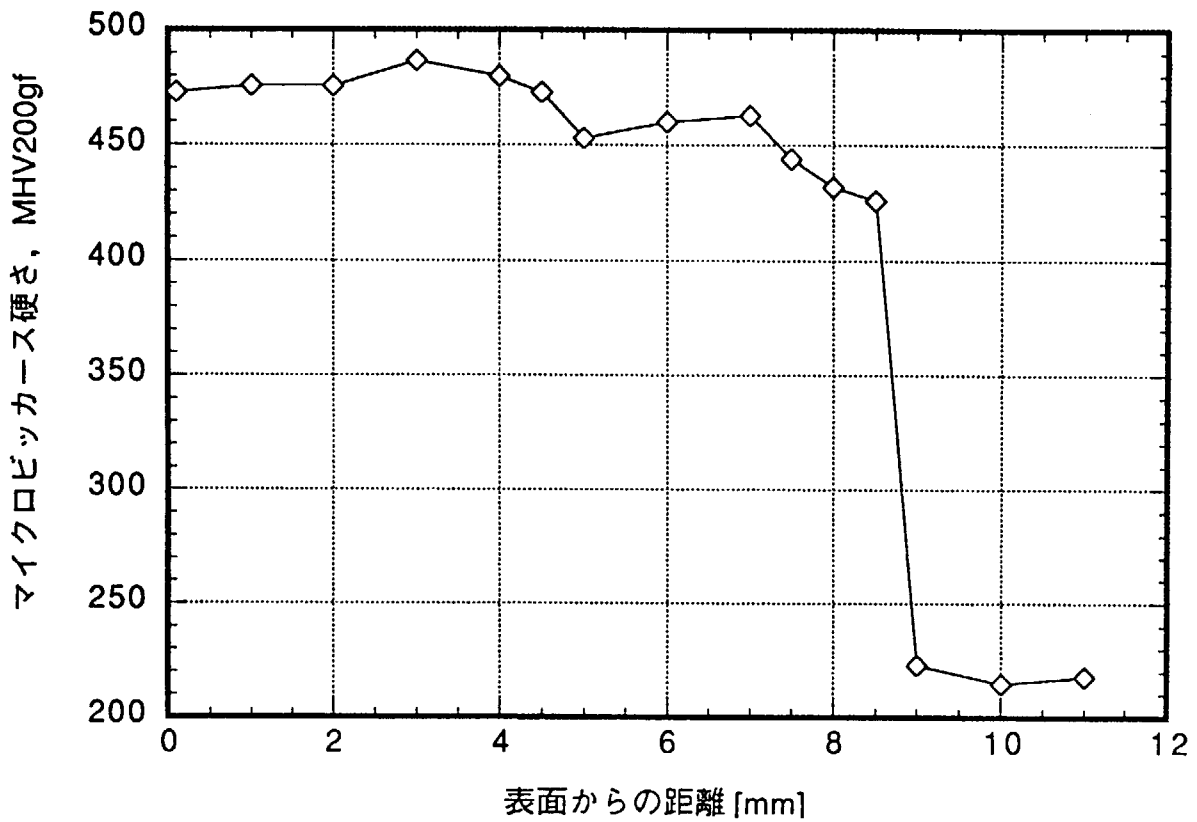


Fig.4.19 Result of Vickers Hardness Test (MM247)

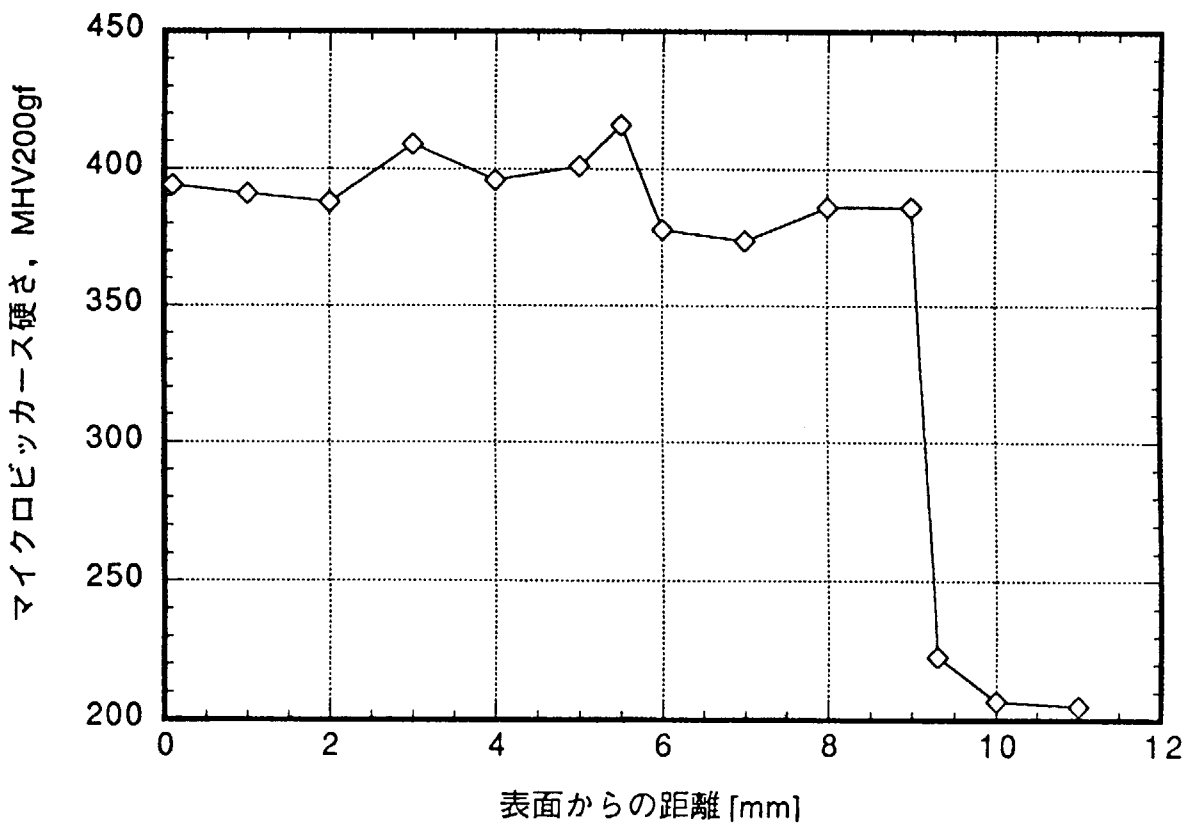


Fig.4.20 Result of Vickers Hardness Test (MM247)

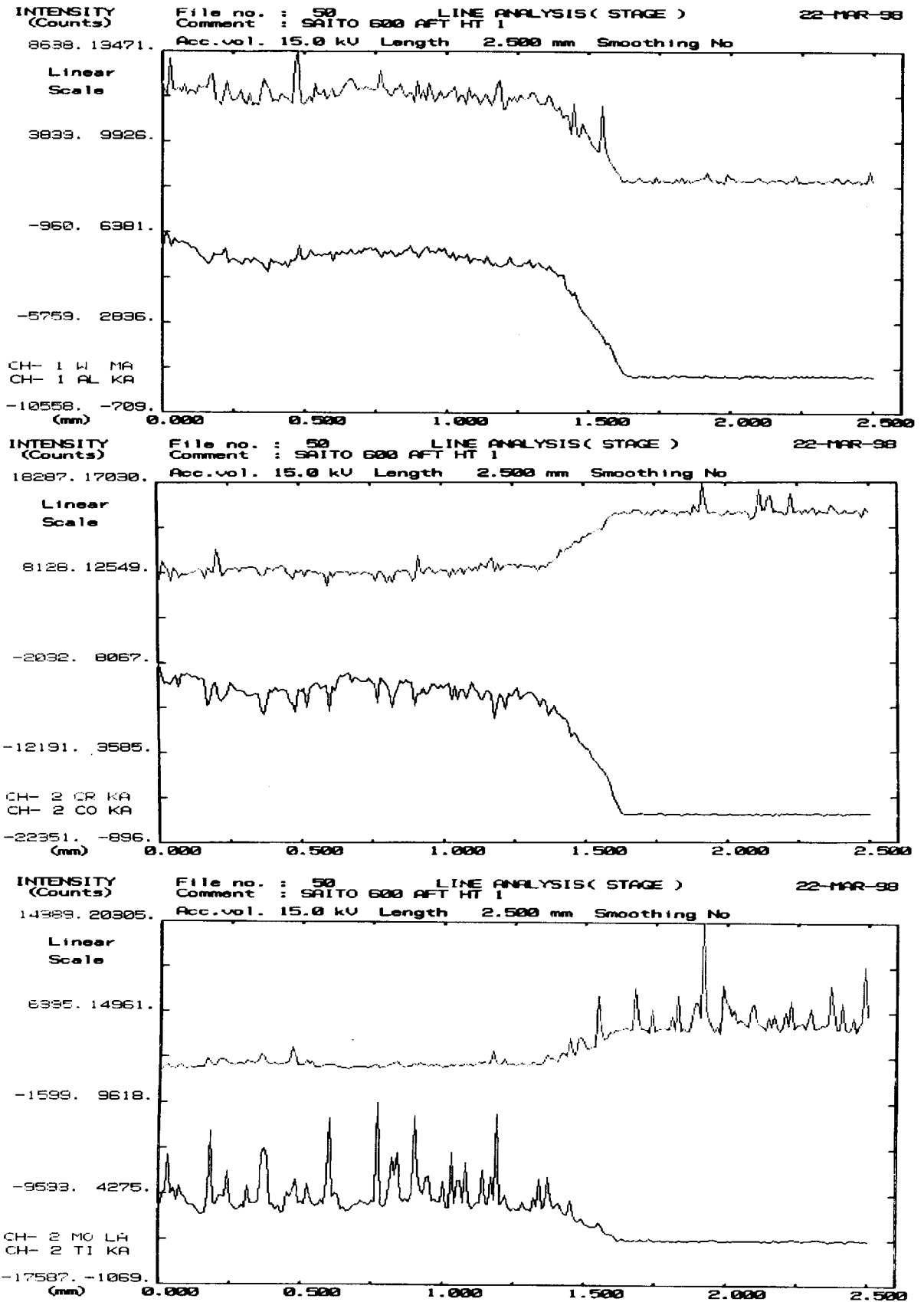


Fig.4.21 Element profiles of interface after 900°C × 200h (MM247)

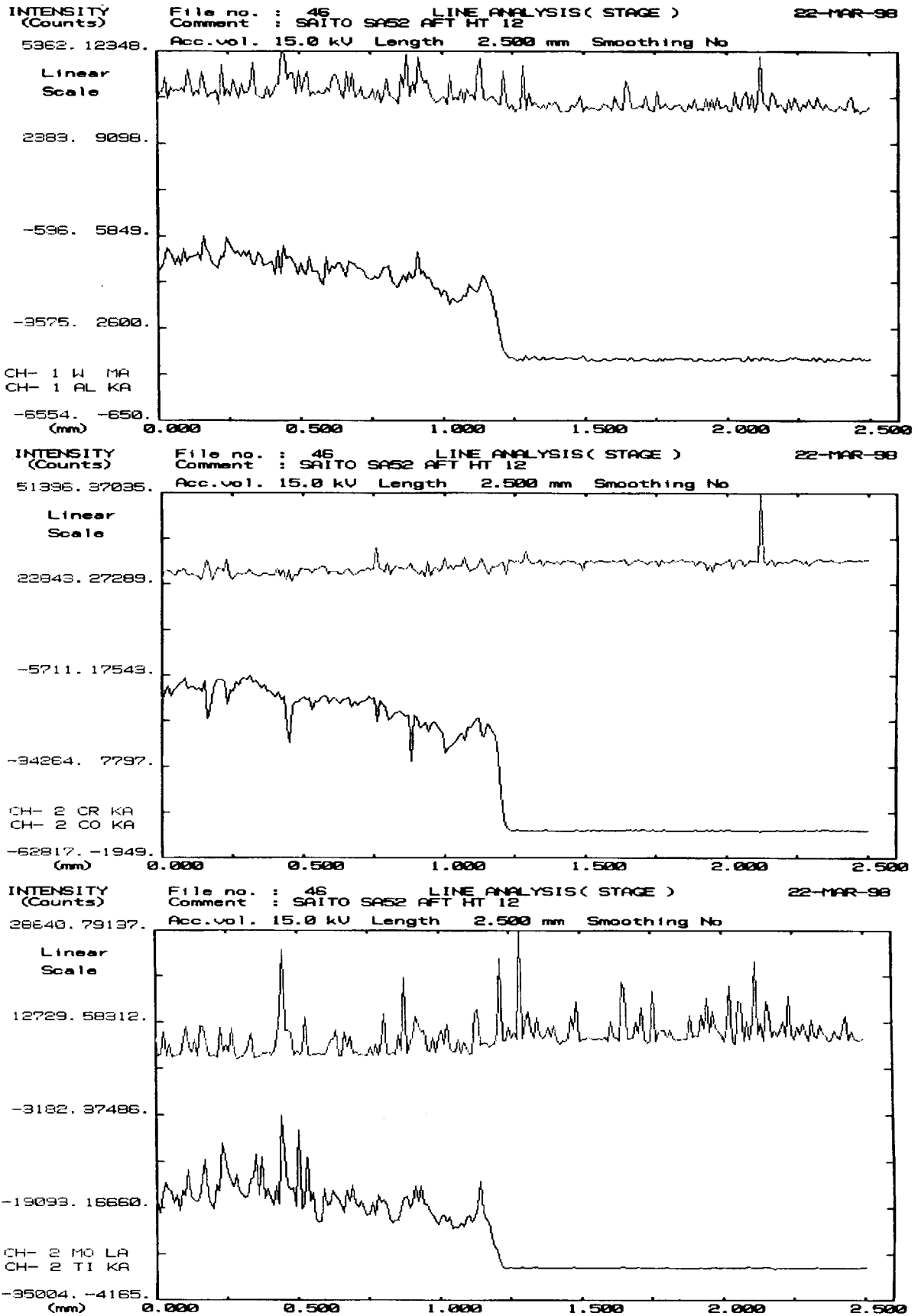


Fig.4.22 Element profiles of interface after 900°C × 200h (SA52)

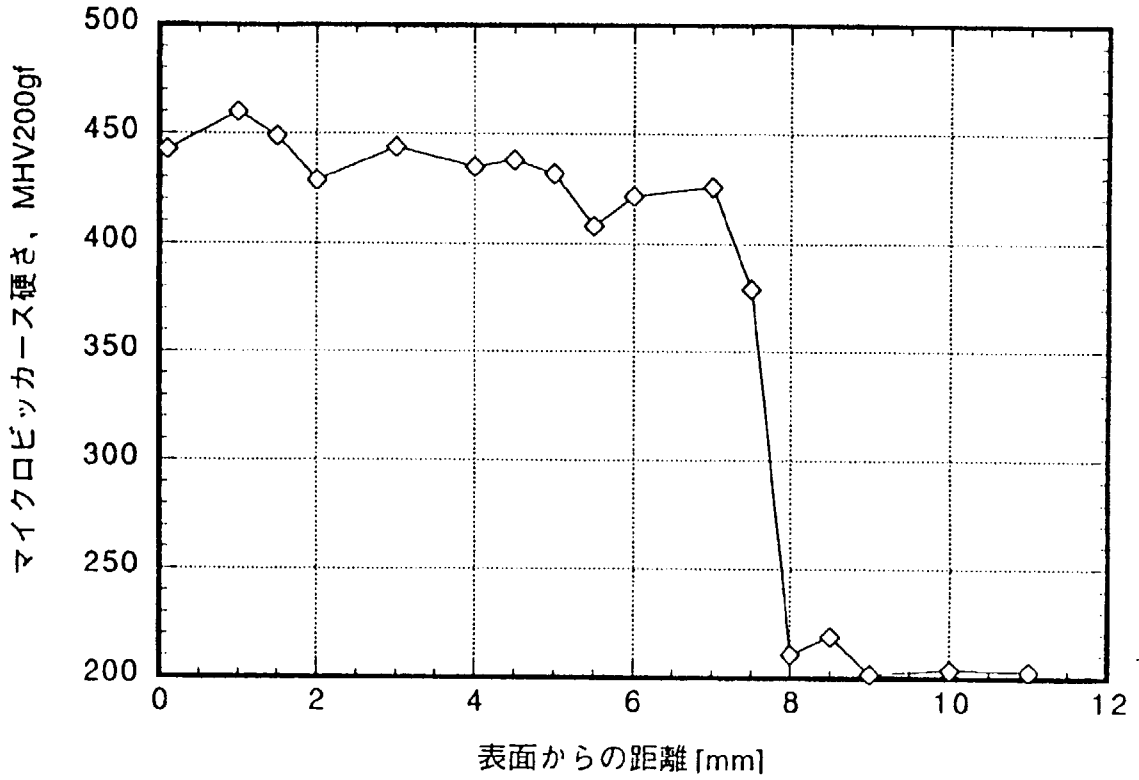


Fig.4.23 Result of Vickers Test after 900°C × 200h (MM247)

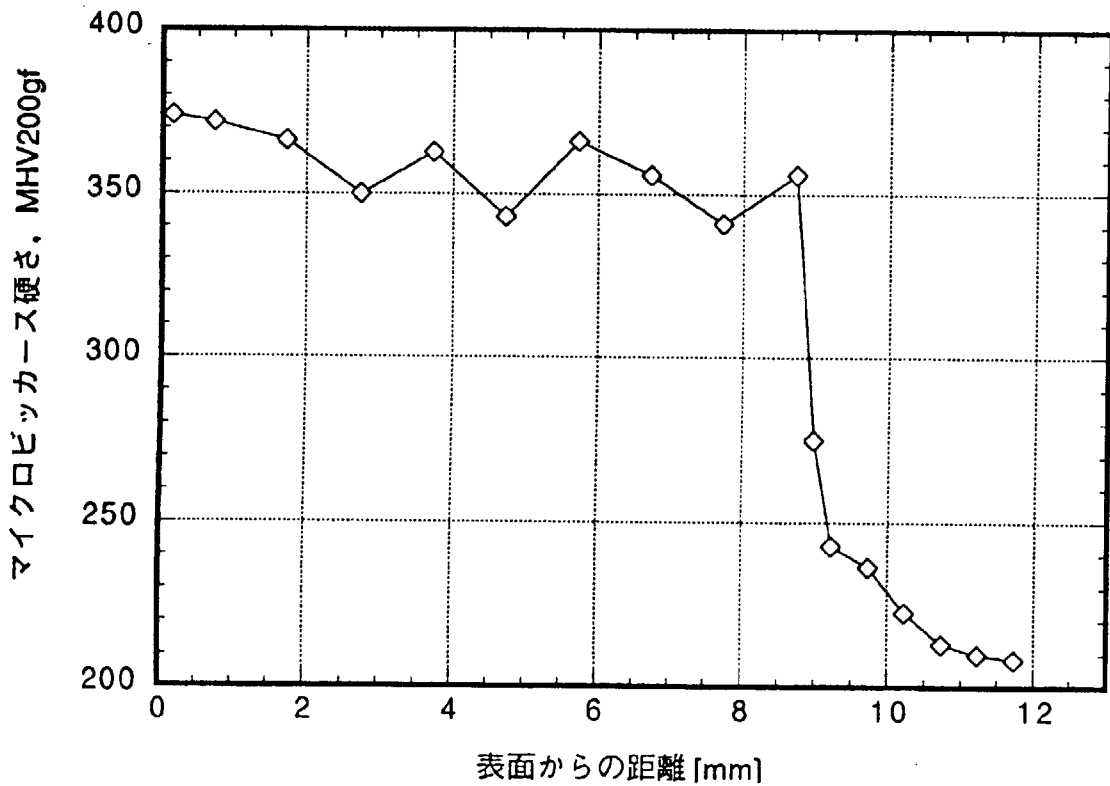


Fig.4.24 Result of Vickers Test after 900°C × 200h (SA52)

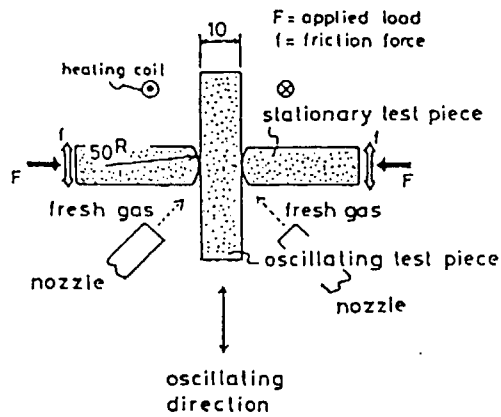


Fig. 5.1 Oscillating Test System

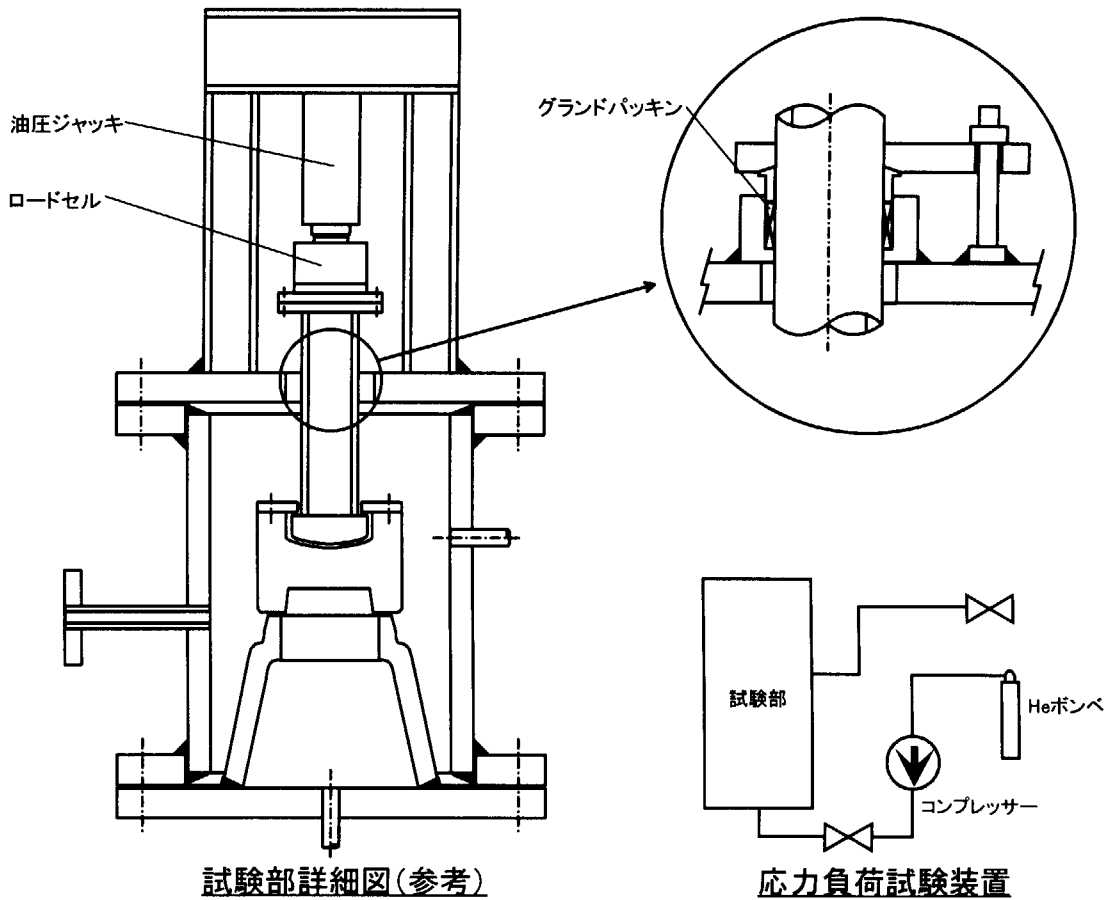


Fig. 5.2 Experimental system of stress loading

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 <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
バ	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 = 0.1 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, 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 (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>5</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高温隔離弁の概念設計及び弁座盛金材料の選定(受託研究)