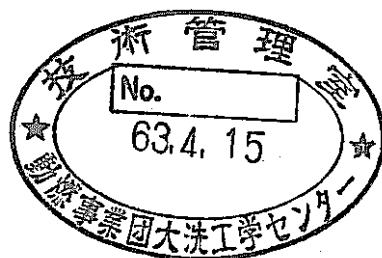


改良型オーステナイト鋼のFCCI特性試験

— 仏国製改良オーステナイト鋼およびSUS316相当鋼大気溶解材 —

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1987年9月

株式会社 日立製作所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

改良型オーステナイト鋼の FCCI特性試験*

— 仏国製改良オーステナイト鋼およびSUS316相当鋼大気溶解材 —

湯谷順明**、和田孝志**
松塚龍二**、山中康靖***
渡 孔男***

要 旨

仏国製改良オーステナイト鋼被覆管とSUS316相当鋼大気中溶解材を用いた被覆管のFCCI特性を把握するため、SUS316相当鋼真空二重溶解材をレファレンス材とし、CsOH-CsI混合物、Teおよびヨウ素を模擬FP腐食剤として、温度700℃、時間100hの条件で、炉外腐食試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) CsOH-CsI混合物 (CsOH/CsI=1) により、粒界腐食が生じた。
- (2) Teおよびヨウ素により全面腐食が生じた。
- (3) 3供試材間に腐食形態の相違はなかった。
- (4) Teの場合を除いて、仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材は、SUS316相当鋼真空二重溶解材と同程度の耐食性を示した。

* 本報告書は、株式会社日立製作所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：610 D 253

事業団担当部課室および担当者：燃料材料開発部 照射燃料試験室（滑川卓志）

** 日本核燃料開発株式会社

*** 株式会社日立製作所

Corrosion Tests for the Evaluation of FCCI Susceptibility of
Advanced Austenitic Stainless Steel*

—Advanced Austenitic Stainless Steel of French Manufacture and
Modified SUS316 Stainless Steel Fabricated by Air Melting Method—

Toshiaki Yutani**, Takashi Wada**
Ryuji Matsuzuka**, Tsuneyasu Yamanaka***
Yoshio Watari***

Abstract

To evaluate the corrosion resistance due to fuel-cladding chemical interaction (FCCI), corrosion tests of an advanced austenitic stainless steel of French manufacture and modified SUS316 stainless steel fabricated by air melting method and double vacuum melting method with CsOH-CsI mixture, tellurium and iodine were conducted at 700°C for 100 hours.

The result were summarized as follows.

- (1) The CsOH-CsI mixture (CsOH-CsI=1) produced intergranular attack.
- (2) Tellurium and iodine produced matrix attack.
- (3) There were little difference in corrosion morphology between three alloys.
- (4) Advanced austenitic stainless steel and modified SUS316 stainless steel fabricated by air melting method had almost same corrosion resistances to CsOH-CsI mixture as and iodine as modified SUS316 stainless steel fabricated by double vacuum melting method.

* Work performed by Hitachi, Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison: Alpha-Gamma Section, Fuels and Materials Division,
O-arai Engineering Center (Takashi Namekawa)

** Nippon Nuclear Fuel Development Co., Ltd.

*** Hitachi Works of Hitachi Ltd.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 試験片	2
2.3 腐食試験	3
2.4 金相試験	3
3. 試験結果	10
3.1 CsOH-CsI混合物またはTeによる腐食試験	10
3.1.1 外観検査	10
3.1.2 縦断面金相	10
3.1.3 横断面金相	11
3.2 ヨウ素による腐食試験	13
3.2.1 重量減少	13
3.2.2 横断面金相	13
4. 検討および評価	35
5. 結 言	36
6. 参考文献	37

List of Tables

- Table 1 Chemical Composition and Fabrication Condition of Claddings
- Table 2 Conditions of Corrosion Tests
- Table 3 Number of Corrosion Test Specimens
- Table 4 Appearance of Specimen's Outer Surface Reacted with CsOH-CsI Mixture
- Table 5 Appearance of Specimen's Outer Surface Reacted with Te
- Table 6 Outer Diameters Changes of Specimens Reacted with CsOH-CsI Mixture or Te
- Table 7 Weight Changes of Specimens Reacted with CsOH-CsI Mixture or Te
- Table 8 Attack Depths for Specimens Reacted CsOH-CsI mixture
- Table 9 Attack Depths for Specimens Reacted with Te
- Table 10 Weight Loss of Specimens Reacted With I_2

List of Figures

- Fig. 1 Corrosion Test Specimens with CsOH-CsI Mixture or Te
- Fig. 2 Heating Block for Corrosion Tests
- Fig. 3 Apparatus for Corrosion Test with Iodine
- Fig. 4 Longitudinal Distribution of Attack Depths by CsOH-CsI Mixture or Te on Advanced Austenitic Stainless Steel
- Fig. 5 Micrographs of Longitudinal Section for Corroded Advanced Austenitic Stainless Steel
- Fig. 6 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with CsOH-CsI Mixture
- Fig. 7 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with CsOH-CsI Mixture
- Fig. 8 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with CsOH-CsI Mixture
- Fig. 9 Comparison of Attacks Depths by CsOH-CsI Mixture
- Fig. 10 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with Te
- Fig. 11 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with Te
- Fig. 12 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with Te
- Fig. 13 Comparison of Attacks Depths by Te
- Fig. 14 Comparison of Weight Loss by I₂
- Fig. 15 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with I₂
- Fig. 16 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with I₂
- Fig. 17 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with I₂
- Fig. 18 Comparison of Attacks by CsOH-CsI, Te and I₂
- Fig. 19 Comparison with Previous Work for Attacks by Te
- Fig. 20 Comparison of Attacks between Advanced Austenitic Stainless Steel Made in France and 15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti Steel
- Fig. 21 Relationships between Attacks and Ni Content
- Fig. 22 Relationships between Attacks and Cr Content
- Fig. 23 Relationships between Attacks and Ti Content

1. 緒 言

高速炉実用化のための重要な課題は、安全性を確保しつつ、経済性を向上させることである。そのため、燃焼度を上げて長寿命化を図るなどの燃料の高性能化や製造仕様を緩和して燃料の製造コストを低減することなどが必要とされる。

高速炉用燃料被覆管は、高温強度と耐スエリング性が優れていることが重要である。また、照射中に燃料-被覆管化学的相互作用 (Fuel Cladding Chemical Interaction: FCCI) により内面腐食を受けるので、耐食性に優れていることも要求される。

現在各国で高速炉用燃料被覆管として用いられている材料は、主に316系オーステナイトステンレス鋼で、わが国でも動力炉・核燃料開発事業団 (以下動燃事業団と略称) が開発したSUS316相当鋼が実験炉「常陽」で用いられており、また、原型炉「もんじゅ」に採用予定である。これら316系ステンレス鋼は、高温強度は高いが、耐スエリング性がやや劣る。このため、耐スエリング性の向上を目指して改良オーステナイト鋼やフェライト鋼などの開発が各国で進められている。このうち改良オーステナイト鋼の例として、仏国の15Cr-15Ni-Mo-Ti鋼や動燃事業団の15Cr-20Ni-Mo-Ti-Nb鋼があげられる。

現在、フェニックス炉と「常陽」を用いた日仏交換照射試験が計画されており、その一環として仏国製の改良オーステナイト鋼被覆管で構成する燃料ピンを、「常陽」で高照射量まで照射される予定である。また、上述のSUS316相当鋼の素材の製造方法は真空二重溶解法であるが、この方法では溶解量が限定されコスト高となる。燃料の製造コストの低減を目的として、大気中溶解法による被覆管の使用が検討されており、これを用いた燃料ピンの「常陽」での照射試験が同じく予定されている。

本試験は、照射試験に先立ち仏国製改良オーステナイト鋼被覆管とSUS316相当鋼大気中溶解材を用いた被覆管のFCCI特性を把握するため、模擬FP腐食剤としてCsOH-CsI混合物、Teおよびヨウ素を用いて炉外腐食試験を行ったものである。なお、比較のためSUS316相当鋼真空二重溶解材の腐食試験も行った。

2. 試験方法

2.1 供試材

試験に用いた被覆管の化学成分等をTable 1に示す。仏国製改良オーステナイト鋼、SUS316相当鋼大気中溶解材およびSUS316相当鋼真空二重溶解材の3種である。これらの被覆管の公称寸法は以下のとおりである。

① 仏国製改良オーステナイト鋼

外径	6.55±0.030mm
内径	5.65±0.025mm
肉厚	0.45±0.030mm

② SUS316相当鋼大気中溶解材

外径	5.500±0.030mm
内径	4.800±0.025mm
肉厚	0.350±0.030mm

③ SUS316相当鋼真空二重溶解材

外径	6.500±0.030mm
内径	5.560±0.025mm
肉厚	0.470±0.030mm

なお、供試材は動燃事業団より支給されたものである。

2.2 試験片

CsOH-CsI混合物またはTeを腐食剤とするときの試験片の形状および寸法をFig. 1に示す。長さ40mmに切断した被覆管の両端に端栓をTIG溶接して腐食剤を密封（封入）したものである。腐食剤の封入量はそれぞれ1gで、精製したアルゴンガス（水分濃度5ppm以下、酸素濃度1ppm以下）中で封入した。また、Cs化合物は潮解性が高く水分を含んでいる恐れがあるので、CsOH-CsI混合物（CsOH/CsI=1）は、真空中（ 1×10^{-3} mmHg）で350℃、1h加熱し、極力水分を取り除いたものを用いた。

一方、ヨウ素を腐食剤とするときは、被覆管を長さ10mmに切断し、試験片とした。

なお、いずれの腐食剤のときも、被覆管をアセトンで超音波洗浄後自然乾燥したのみで、受け入れたまま試験に供した。

2.3 腐食試験

試験条件および試験数をTable 2および3に示す。

CsOH-CsI混合物またはTeを腐食剤とするときは、真空加熱炉にて同一腐食剤の試験片を同時に等温加熱した。なお、試験片内および試験片間の温度分布を極力均一にするため、試験片をFig. 2に示す均熱ブロックに入れて加熱した。

ヨウ素を腐食剤とするときは、Fig. 3に示す装置を用いた。この装置は市販のヨウ素を精製した後、一定の蒸気圧のヨウ素中で、試験片を所定の温度、時間で反応させるために、市販のヨウ素を入れる部分（温浴）、ヨウ素供給部（氷-水浴）、反応管部および液体窒素トラップなどから成る。

試験は全供試材同時に（1供試材当り2試験片）行った。また、市販のヨウ素は、大気に触れ空気や水分を内臓あるいは吸着していると考えられるので、腐食試験に先立ちヨウ素の精製をした⁽¹⁾。精製ヨウ素が析出する部分まで予め真空に引いた後、市販のヨウ素を装荷し、最初は室温にしたまま真空に引いた。次に、市販のヨウ素の部分を温浴に、また、ヨウ素を析出させる部分を氷-水浴に浸し、市販のヨウ素を揮発させ析出部に析出させた。0°Cにおけるヨウ素の飽和蒸気圧が約4.2Paであるのに対し、水のそれは612Paであるので、ある程度の水分と空気を除去することができると考えられる。また、析出部を通りすぎたヨウ素は液体窒素トラップに補集した。

ヨウ素を精製した後、反応管部を油拡散ポンプで十分真空に引き電気炉の加熱を開始した。700°Cに達したら、真空引きを停止しヨウ素の供給を開始した。100h経過後ヨウ素の供給を停止した。なお、試験中は1日に1度系内を油拡散ポンプで真空に引いた（約30sec）。試験後、重量測定をし、重量減少量により腐食の程度を比較した。

2.4 金相試験

CsOH-CsI混合物またはTeを腐食剤とするときは、腐食試験後、外観検査および重量変化と外径変化を測定した後、仏国製改良オーステナイト鋼の3試験片のうち各1試験片について、縦断面金相試験を行って、残りの試験片の横断面切断位置を決めた。残りの試験片については横断面の金相写真を撮影し（90度ずつ角度を変え4視

野)、これから腐食深さを求めた。

一方、ヨウ素を腐食剤とするときは、一部の試験片について横断面の金相観察をし、腐食形態に特異なところがないかどうか調べた。

Table 1 Chemical Composition and Fabrication Condition of Claddings

被覆管	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Cu	Ti	U	Nb+Ta	As	Al	O	Zr	加工度
仏国製改良オース テナイト鋼	0.030	0.59	1.59	0.020	<0.001	14.6	15.6	1.18	0.014	0.0049	0.009	-	0.43	-	-	-	0.029	-	-	15 ~ 20
SUS316相当鋼 大気中溶解材 (LRK2)	0.057	0.62	1.80	0.011	0.005	13.56	16.06	2.44	0.03	0.0001	0.025	0.002	0.09	0.05	0.070	0.002	0.026	0.0000	<0.01	18
SUS316相当鋼 真空二重溶解材 (S554)	0.047	0.92	1.74	0.030	0.004	13.74	16.50	2.50	0.005	0.0039	0.0077	0.002	0.097	0.002	0.070	0.002	0.040	0.0018	-	19.2

Table 2 Conditions of Corrosion Tests

項 目		内 容		
腐 食 剤	種類	CsOH+CsI	Te	I ₂
	量または圧力	1g	1g	4.2Pa
供 試 材		仏国製改良オーステナイト鋼 SUS316相当鋼大気中溶解材 SUS316相当鋼真空二重溶解材		
試 験 時 間		100h		
試 験 温 度		700℃		

Table 3 Number of Corrosion Test Specimens

腐 食 剤	供 試 材		
	仏国製改良 オーステナイト鋼	SUS316相当鋼 大気中溶解材	SUS316相当鋼 真空二重溶解材
CsOH+CsI	3*	2	2
Te	3*	2	2
I	2	2	2

* うち1つは縦断面金相試験用

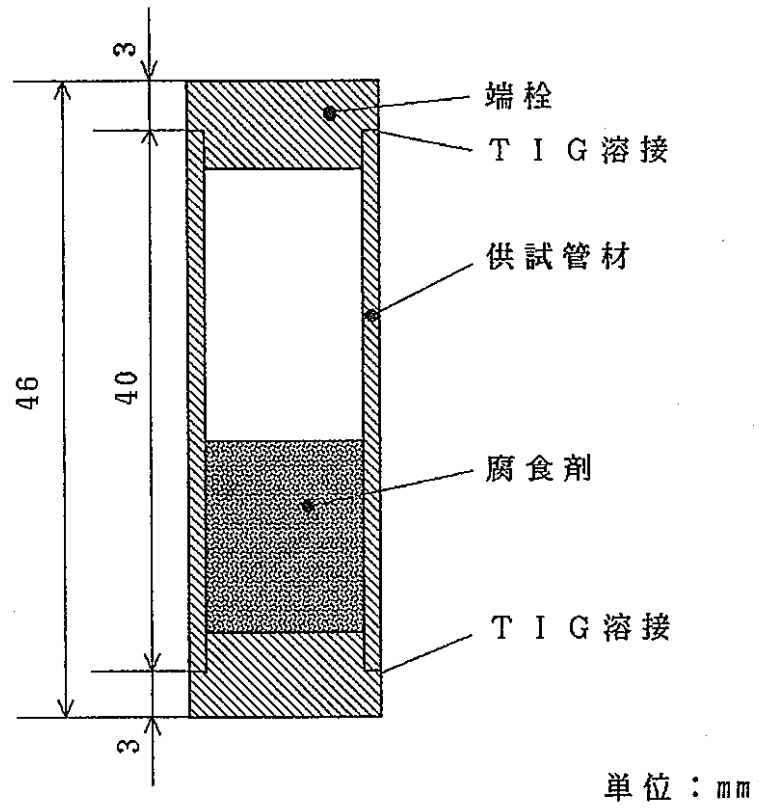


Fig.1 Corrosion Test Specimens with CsOH-CsI Mixture or Te

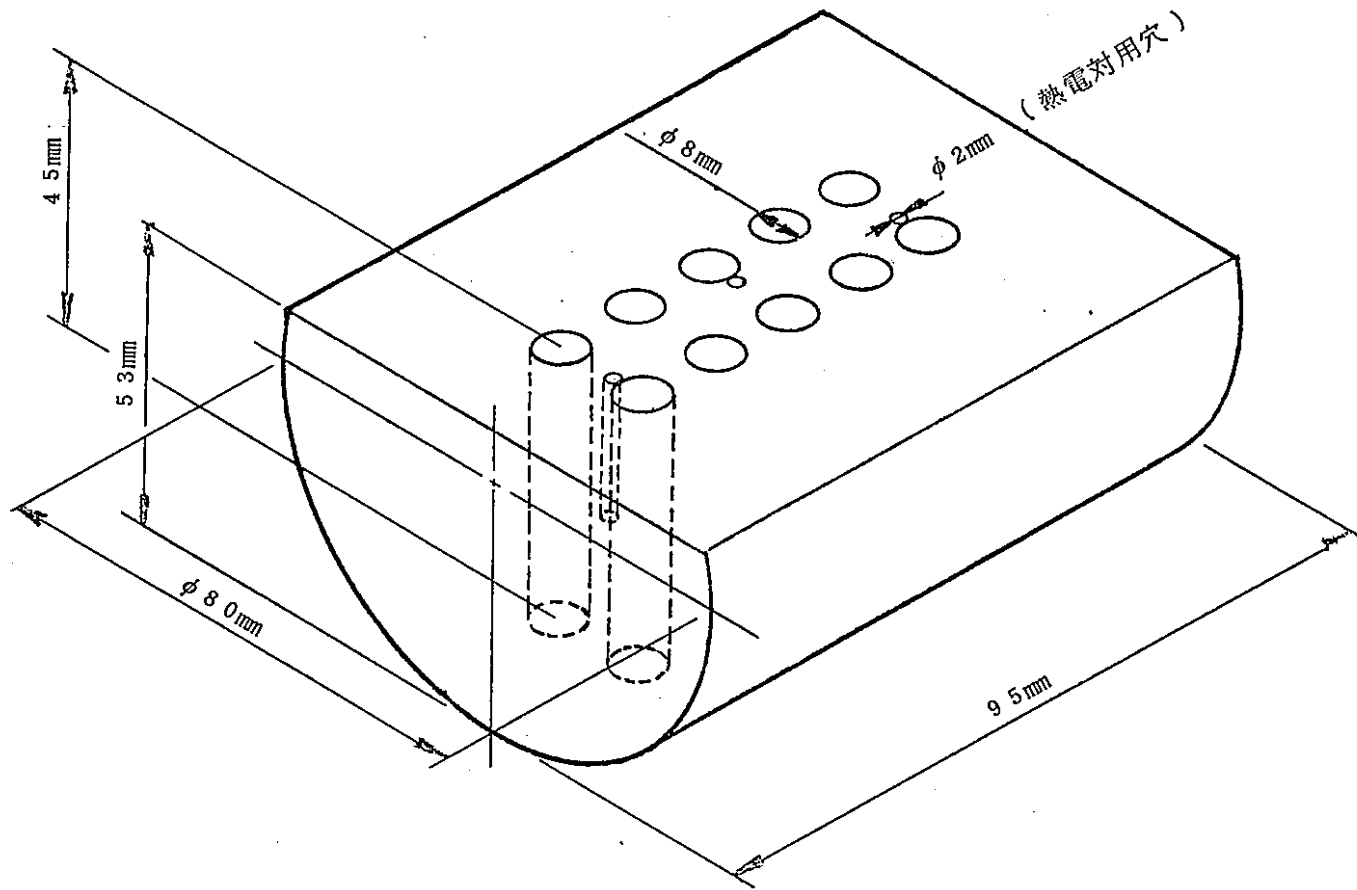


Fig.2 Heating Block for Corrosion Tests

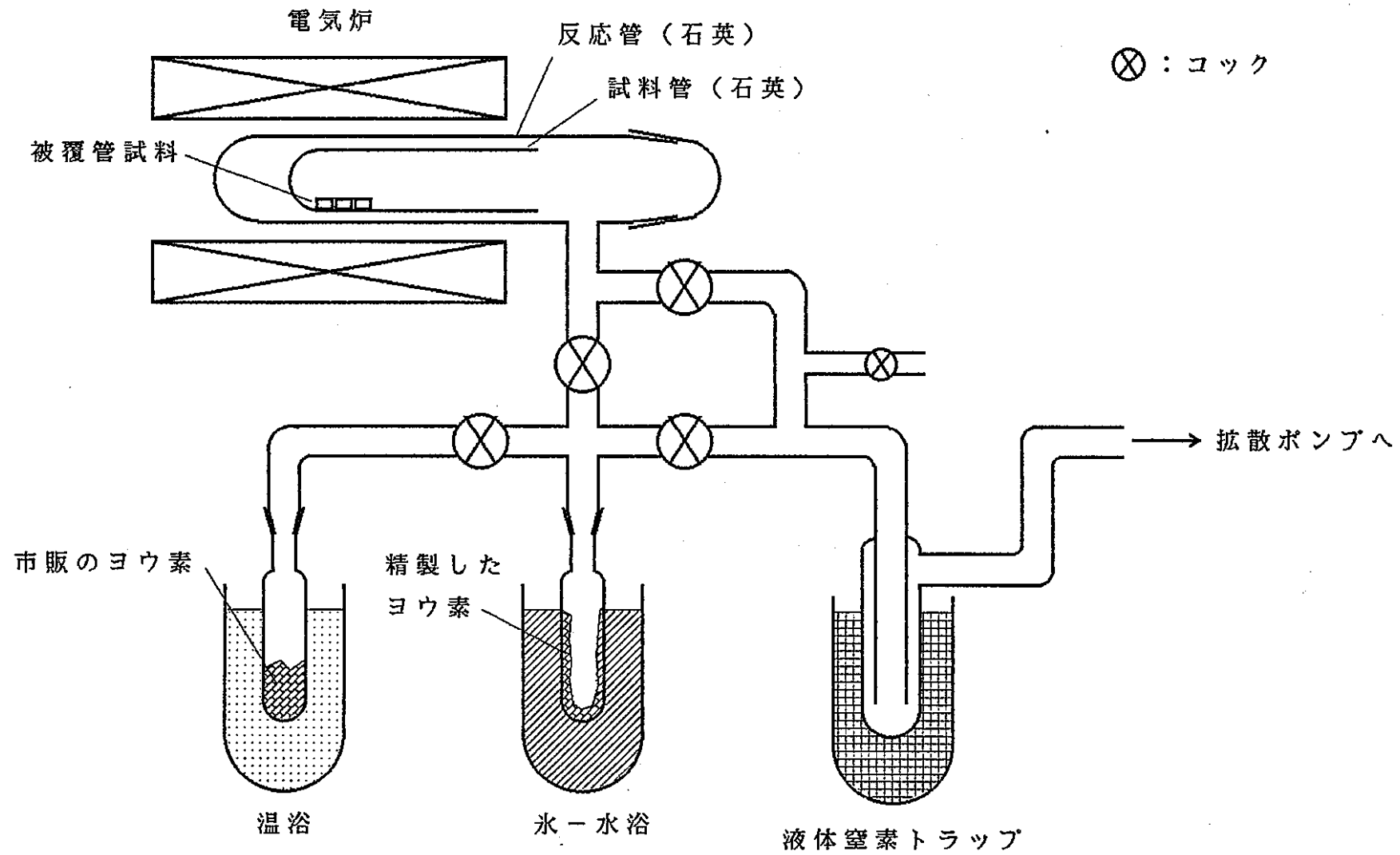


Fig.3 Apparatus for Corrosion Test with Iodine

3. 試験結果

3.1 CsOH-CsI混合物またはTeによる腐食試験

3.1.1 外観検査

加熱後の試験片の外観観察結果をTable 4および5に示す。また、試験前後の外径測定結果をTable 6に、重量測定結果をTable 7に示す。

CsOH-CsI混合物を腐食剤としたときは、SUS316相当鋼真空二重溶解材を除いて、外観は青みを帯びた光沢のある黒色を呈していた。外径には試験前後で顕著な差はないが、重量は僅かに減少しているのが認められた。

一方、Teを腐食剤としたときは、仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材が青みを帯びた白色を呈していたのに対し、SUS316相当鋼真空二重溶解材は銀白色を呈していた。外径は試験前後で顕著な差がなく、また、重量変化はSUS316相当鋼真空二重溶解材が僅かに増加したのに対し、他は測定精度内の変化であった。これらの差破材質および加熱真空条件の微妙な差に起因すると思われるが試験上の問題はない。

また、いずれの試験片もクラックなどはなく、腐食剤がしみ出ている様子もなかった。

3.1.2 縦断面金相

仏国製改良オーステナイト鋼の縦断面金相写真から求めた腐食深さ分布をFig. 4に示す。また、下部端栓の内側から約5mm離れたところの縦断面金相写真をFig. 5に示す。Fig. 4で、腐食深さは、もとの内面位置が明確でないので、元の肉厚を450 μ mとし、これから腐食していない部分の肉厚（測定値）を差し引いて求めた。なお、縦断面の場合中心付近で観察しないと、肉厚は必ず真の値より大きい値となるが、もとの内面位置が明確なところあるいは腐食していないところで観察したところ、450~460 μ mであった。

CsOH-CsI混合物を腐食剤とするときは、Fig. 5に見られるように粒界腐食であるが、腐食深さが局部的に深くなっているところはない。また、内面側に剥離が認められる。腐食深さは、下部端栓の内側のところから見ていくと、下部端栓の内側のところで約230 μ m、それから15mm離れたところで200 μ mで、その間ゆるやかに

減少している。15mmを越えると急激に減少し、25mm離れたところで約100 μm となる。それから先はほぼ一定である。また、断面の両側ともほぼ同じ値の腐食深さである。なお、試験片の内面観察から、下部端栓の内側から約15mm離れたところまで、試験時に液体の状態の腐食剤が存在したと考えられる。

一方、Teを腐食剤とするときは、全面腐食である。腐食層と非腐食層との境界は明確でかつ直線的である。この2つの層を合計した厚さは、もとの肉厚よりも大幅に減少している。また、腐食層の内側にはTeが主成分と考えられる層がある。この層は2つに分かれている。腐食深さは、下部端栓の内側より0.5mm離れたところから10mm離れたところまではほぼ一定で210~220 μm である。14mm離れたところで約180 μm になり、それから急激に減少し、22mmから先では0 μm すなわち腐食していない。また、CsOH-CsI混合物を腐食剤とするときと同様に断面の両側ともほぼ同じ値である。なお、Teの密度から計算すると、液体状態のTeは下部端栓から約15mmのところまで試験開始時に存在していたことになる。

以上の縦断面の腐食深さ分布測定結果から、下部端栓より約5mm離れたところは腐食剤を問わず、腐食深さの縦方向分布の変化が少なくかつ最大深さに近い値であると言える。これから、残りの試験片の横断面金相観察位置を下部端栓の内側より5mm離れたところとした。

3.1.3 横断面金相

(1) 腐食剤：CsOH-CsI混合物

CsOH-CsI混合物を腐食剤としたときの腐食深さ測定結果をTable 8に示す。また、横断面金相写真（供試材当り1試験片）をFig. 6~Fig. 8に示す。腐食深さは、図に示す横断面の4箇所測定したもので、それぞれの視野で腐食深さが最大と思われるところを測定した。

腐食形態は、いずれも粒界腐食で、供試材間および試験片間の差はない。また、局部的に腐食深さが深くなっているところはない。

仏国製改良オーステナイト鋼の場合、腐食深さのばらつきは少なく、試験片内で平均値に対し4%以内、試験片間で平均値に対し5%である。SUS316相当鋼大気中溶解材の場合は、試験片内のばらつきは最大12%であるが、試験片間のばらつきは少なく5%である。これに対し、SUS316相当鋼真空二重溶解材は、試験

片内のばらつきは少ないが、試験片間のばらつきは18%と大きい。

Fig. 9に、腐食深さの最小値、平均値および最大値について、供試材間で比較したものを示す。図で最小値は仏国製改良オーステナイト鋼が高く、他の2供試材間には有意差がない。これに対し、平均値と最大値は同じ傾向を示しており、腐食深さは、仏国製改良オーステナイト鋼、SUS316相当鋼真空二重溶解材、SUS316相当鋼大気中溶解材の順である。

(2) 腐食剤：Te

Teを腐食剤としたときの腐食深さ測定結果をTable 9に示す。また、横断面金相写真（供試材当り1試験片）をFig. 10～Fig. 12に示す。腐食深さは、図に示す横断面の4箇所測定したもので、それぞれの視野で腐食深さが最大であるところを測定した。

腐食形態はいずれも全面腐食で、供試材間に差がない。しかし、各供試材とも腐食深さに偏りがある試験片が認められた。Fig. 10～Fig. 12に示したのがそれで、仏国製改良オーステナイト鋼のTF-3、SUS316相当鋼大気中溶解材のTA-2およびSUS316相当鋼真空二重溶解材のTD-2である。特に、TA-3では視野の1つが他より深く、また、TD-2では局部的に深くなっているのが認められる。なお、重量増加が認められたSUS316相当鋼真空二重溶解材では、外面側に酸化物と思われる層が認められる。

腐食深さを見ると、仏国製改良オーステナイト鋼の場合、TF-2はばらつきが少ないが、腐食深さに偏りがあるTF-3では平均値に対し最大32%ばらついている。しかし、試験片間のばらつきは少ない。SUS316相当鋼大気中溶解材の場合は、TA-3を除いて試験片内のばらつきは多い、また、試験片間ではTA-1とTA-3がほぼ同じ値であるのに対しTA-2のみ20%ほど高い値である。SUS316相当鋼真空二重溶解材の場合は、他の供試材よりはばらつきが少ない。

Fig. 13に、腐食深さの最小値、平均値および最大値について、供試材間で比較したものを示す。最小値は仏国製改良オーステナイト鋼が高く、他の2供試材は同じ値である。平均値と最大値は同じ傾向を示し、仏国製改良オーステナイト鋼、SUS316相当鋼大気中溶解材、SUS316相当鋼真空二重溶解材の順である。

3.2 ヨウ素による腐食試験

3.1.1 重量減少

単位表面積当りの重量減少量をTable 10に示す。試験後は水洗前後に重量測定し、水洗後の値を試験後の重量とした。水洗後に比較して水洗前の値は最大5%高く、反応生成物の一部が試験片に付着していたことを示す。また、残りの反応生成物は、Fig. 3に示した試験装置の試料管に付着していた。なお、以前実施したヨウ素による腐食試験で、試験片と試料管に付着していた反応生成物の元素量（Fe、Cr、Ni、Mn、Moなどの合金成分）を分析したところ、重量減少量と反応生成物に含まれる合金成分の重量はほぼ等しい値であった⁽²⁾。したがって、重量減少量で腐食の大小を比較できると考えられる。

各供試材とも試験片間のばらつきは少なく、最大でもSUS316相当鋼真空二重溶解材で平均値に対し約14%ばらついているのにすぎない。

重量減少量を供試材間で比較すると、Fig. 14示すように、平均値ではSUS316相当鋼大気中溶解材、SUS316相当鋼真空二重溶解材、仏国製改良オーステナイト鋼の順である。また、最大値では、仏国製改良オーステナイト鋼が低い値で、SUS316相当鋼大気中溶解材とSUS316相当鋼真空二重溶解材には有意差がない。

3.2.2 横断面金相

横断面の金相写真（供試材当り1試験片）をFig. 15~17に示す。腐食形態はいずれも全面腐食である。腐食層は多孔質になっており、また、非腐食層との境界直線的でなく、凸凹している。多孔質になっている腐食層は、以前の腐食試験におけるEPM分析結果から、Niを主体としていると考えられる。

内面側も外面側も腐食されているが、仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼真空二重溶解材については、外面に比較して内面の方が多く腐食している。SUS316相当鋼大気中溶解材の場合は内面と外面の腐食が同程度である。

Table 4 Appearance of Specimen's Outer Surface Reacted with CsOH-CsI Mixture

供 試 材	試験片番号	被覆管外観
仏国製改良オーステナイト鋼	C F - 1	青みを帯びた黒色 (光沢あり)
	C F - 2	青みを帯びた黒色 (光沢あり)
	C F - 3	青みを帯びた黒色 (光沢あり)
S U S 316相当鋼大気中溶解材	C A - 1	青みを帯びた黒色 (光沢あり)
	C A - 2	青みを帯びた黒色 (光沢あり)
S U S 316相当鋼真空二重溶解材	C D - 1	大部分が銀白色 (光沢なし)
	C D - 2	黒色 (光沢なし)

Table 5 Appearance of Specimen's Outer Surface Reacted with Te

供 試 材	試験片番号	被覆管外観
仏国製改良オーステナイト鋼	T F - 1	青みを帯びた白色
	T F - 2	青みを帯びた白色
	T F - 3	青みを帯びた白色
S U S 316相当鋼大気中溶解材	T A - 1	青みを帯びた白色
	T A - 2	青みを帯びた白色
	T A - 3	青みを帯びた白色
S U S 316相当鋼真空二重溶解材	T D - 1	銀白色
	T D - 2	銀白色

Table 6 Outer Diameters Changes of Specimens Reacted with CsOH-CsI Mixture or Te

腐食剤	供試材	試験片 番号	直径 (mm)	
			試験前	試験後
CsOH + CsI	仏国製改良オース テナイト鋼	CF-1	6.536~6.540	6.537~6.541
		CF-2	6.536~6.543	6.535~6.544
		CF-3	6.535~6.540	6.533~6.544
	SUS316相当鋼 大気中溶解材	CA-1	5.498~5.501	5.498~5.503
		CA-2	5.496~5.501	5.496~5.511
	SUS316相当鋼 真空二重溶解材	CD-1	6.503~5.504	6.505~6.516
		CD-2	6.502~6.505	6.503~6.514
	Te	仏国製改良オース テナイト鋼	TF-1	6.533~6.536
TF-2			6.536~6.540	6.533~6.543
TF-3			6.535~6.540	6.537~6.548
SUS316相当鋼 大気中溶解材		TA-1	5.496~5.500	5.495~5.505
		TA-2	5.496~5.500	5.498~5.504
		TA-3	5.497~5.499	5.497~5.509
SUS316相当鋼 真空二重溶解材		TD-1	6.501~6.504	6.506~6.511
		TD-2	6.503~6.504	6.506~6.510

Table 7 Weight Changes of Specimens Reacted with CsOH-CsI Mixture or Te

腐食剤	供試材	試験片 番号	重量 (g)		
			試験前	試験後	差
CsOH + CsI	仏国製改良オース テナイト鋼	CF-1	6.160	6.122	-0.038
		CF-2	6.266	6.252	-0.014
		CF-3	6.210	6.199	-0.011
	SUS316相当鋼 大気中溶解材	CA-1	4.599	4.558	-0.041
		CA-2	4.609	4.605	-0.004
	SUS316相当鋼 真空二重溶解材	CD-1	6.354	6.346	-0.008
		CD-2	6.332	6.324	-0.008
	Te	仏国製改良オース テナイト鋼	TF-1	6.248	6.249
TF-2			6.260	6.261	0.001
TF-3			6.257	6.258	0.001
SUS316相当鋼 大気中溶解材		TA-1	4.609	4.610	0.001
		TA-2	4.599	4.600	0.001
		TA-3	4.543	4.544	0.001
SUS316相当鋼 真空二重溶解材		TD-1	6.324	6.328	0.004
		TD-2	6.337	6.340	0.003

Table 8 Attack Depths for Specimens Reacted CsOH-CsI mixture

供試材	試験片	腐食深さ (μm)				
	番号	①	②	③	④	平均
仏国製改良オーステナイト鋼	CF-1	205	200	210	215	208
	CF-2	235	230	235	220	230
	平均	—	—	—	—	219
SUS316相当鋼大気中溶解材	CA-1	150	170	180	145	161
	CA-2	160	175	190	180	176
	平均	—	—	—	—	169
SUS316相当鋼真空二重溶解材	CD-1	140	150	160	145	149
	CD-2	220	215	210	215	215
	平均	—	—	—	—	182

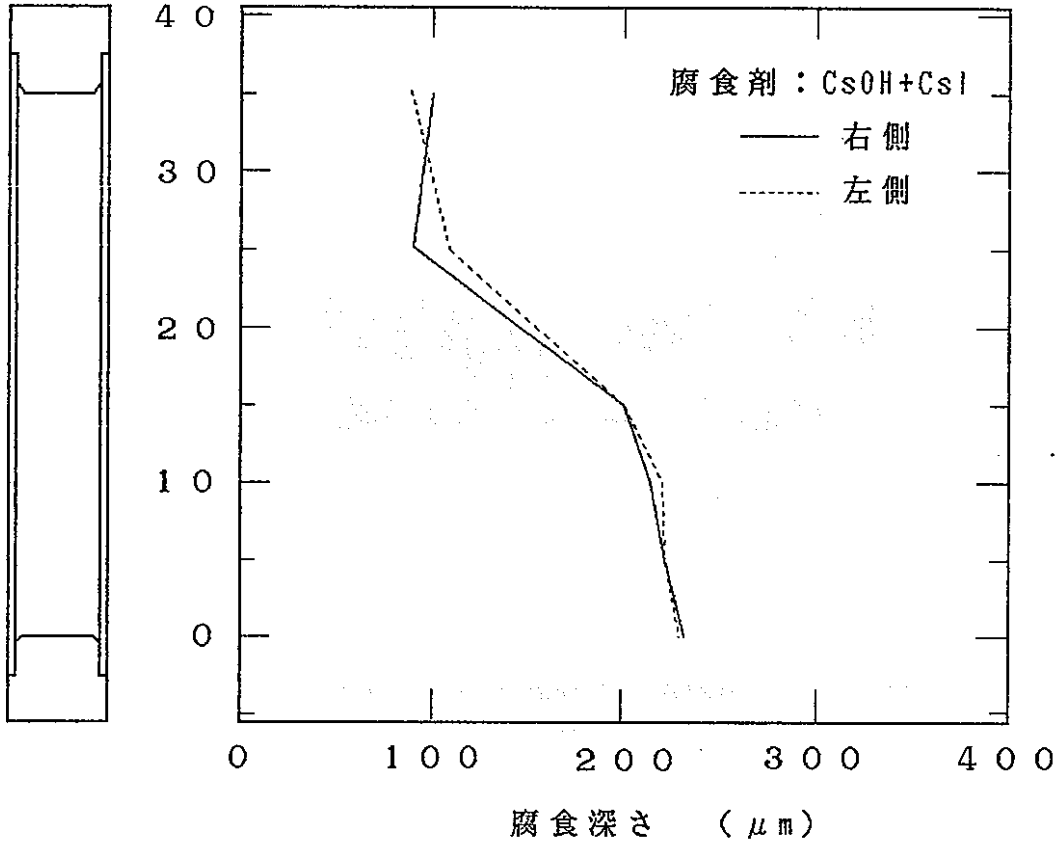
Table 9 Attack Depths for Specimens Reacted with Te

供試材	試験片	腐食深さ (μm)				
	番号	①	②	③	④	平均
仏国製改良オーステナイト鋼	TF-2	215	200	215	215	211
	TF-3	315	210	210	215	238
	平均	—	—	—	—	225
SUS316相当鋼大気中溶解材	TA-1	215	165	185	235	200
	TA-2	290	195	245	240	243
	TA-3	215	205	180	225	206
	平均	—	—	—	—	216
SUS316相当鋼真空二重溶解材	TD-1	175	185	165	165	173
	TD-2	170	210	205	170	189
	平均	—	—	—	—	181

Table 10 Weight Loss of Specimens Reacted with I₂

供 試 材	試験片番号	重量損失量 (mg/cm ²)
仏国製改良オーステナイト鋼	I F - 1	12.2
	I F - 2	12.7
	平 均	12.5
S U S 316相当鋼大気中溶解材	I A - 1	14.8
	I A - 2	13.7
	平 均	14.3
S U S 316相当鋼真空二重溶解材	I D - 1	11.2
	I D - 2	14.9
	平 均	13.1

下部端栓の内側からの距離 (mm)



下部端栓の内側からの距離 (mm)

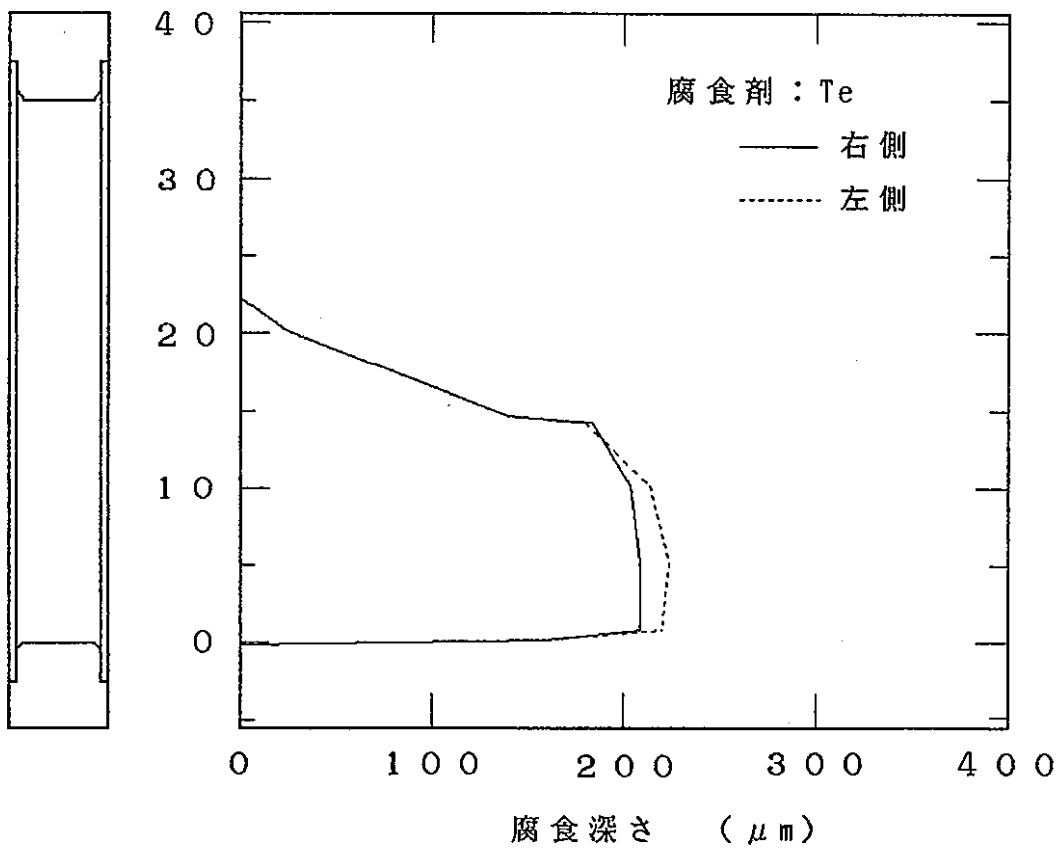


Fig.4 Longitudinal Distribution of Attack Depths by CsOH-CsI Mixture or Te on Advanced Austenitic Stainless Steel

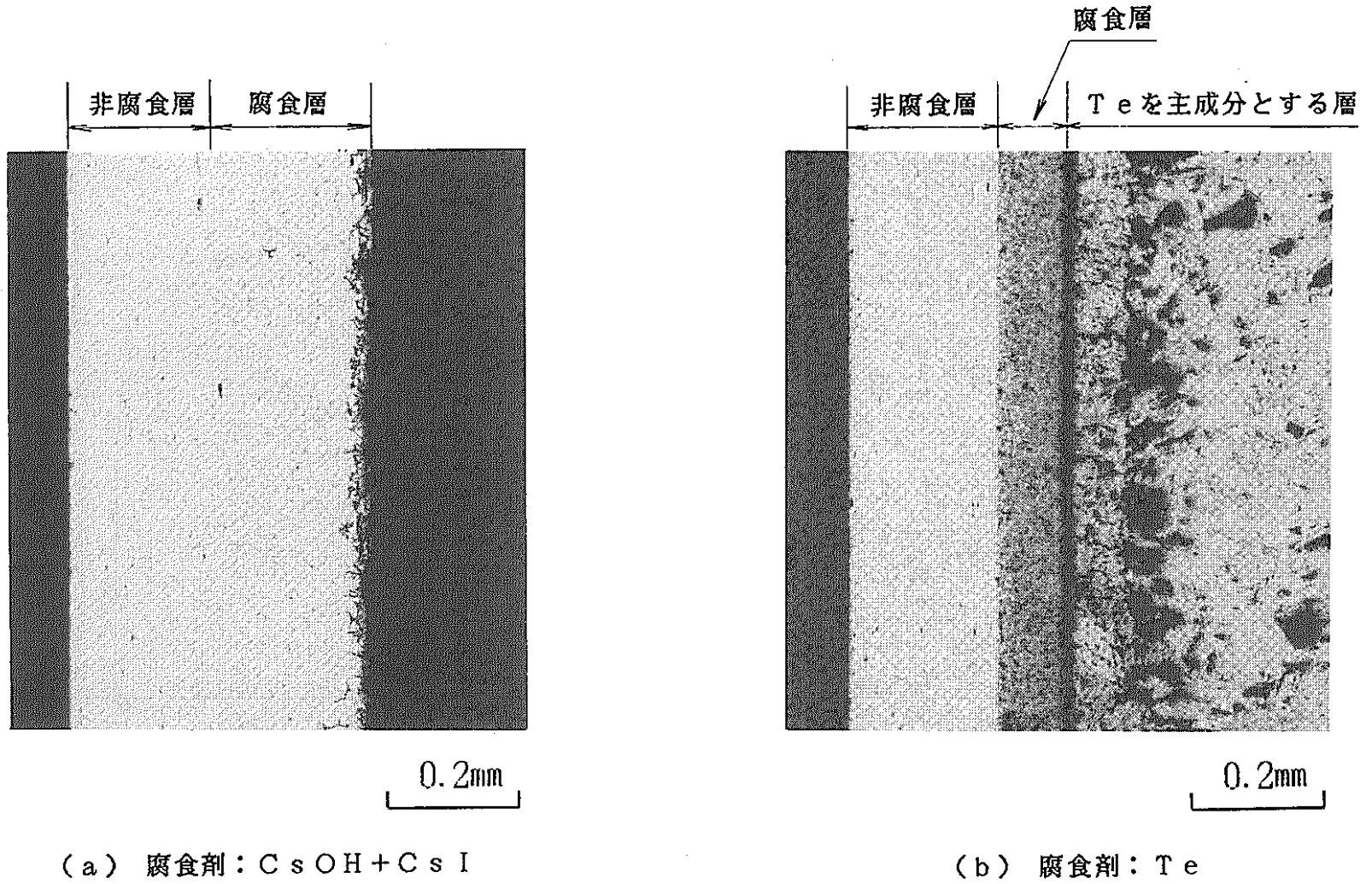


Fig. 5 Micrographs of Longitudinal Section for Corroded Advanced Austenitic Stainless Steel

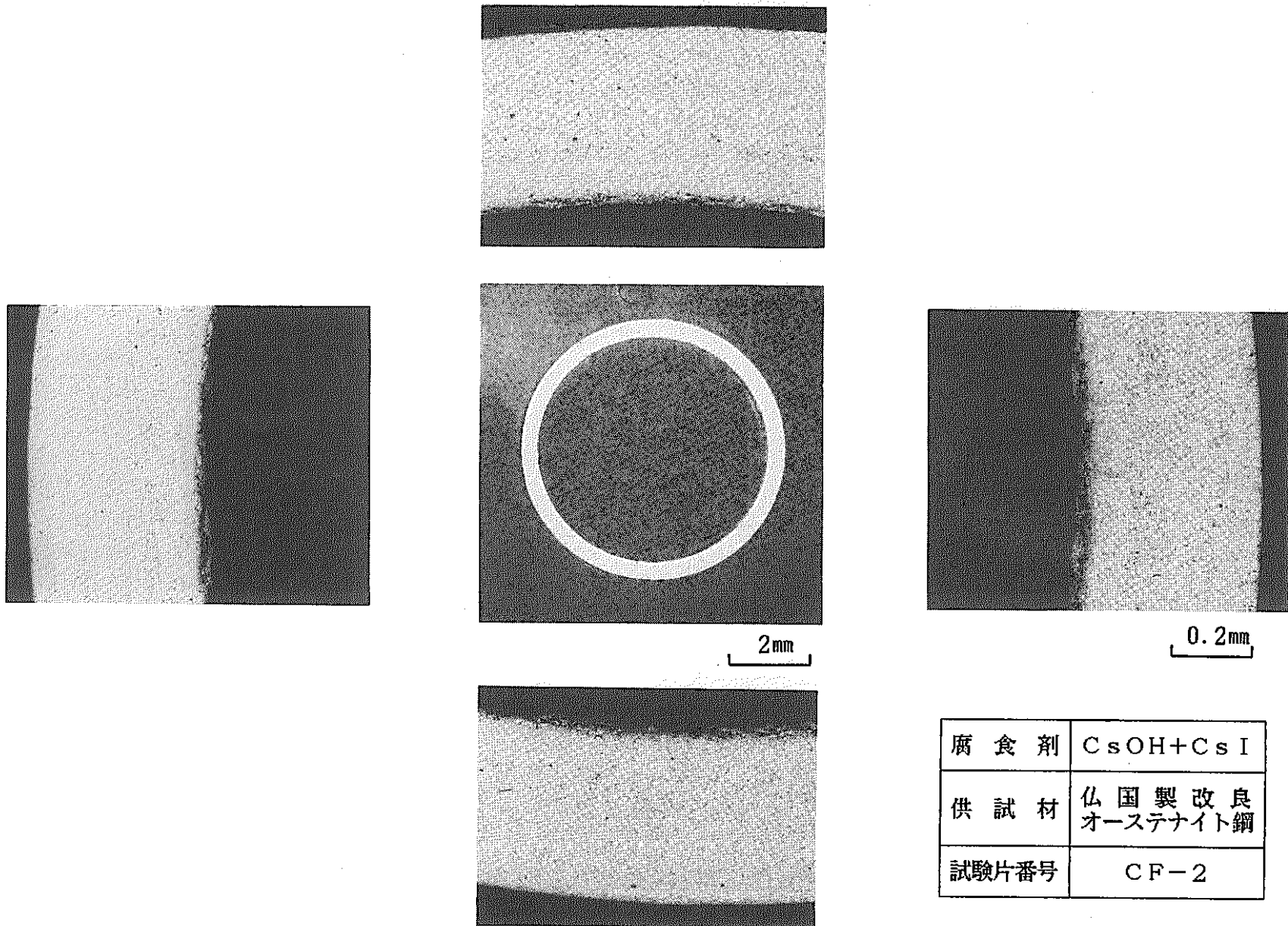
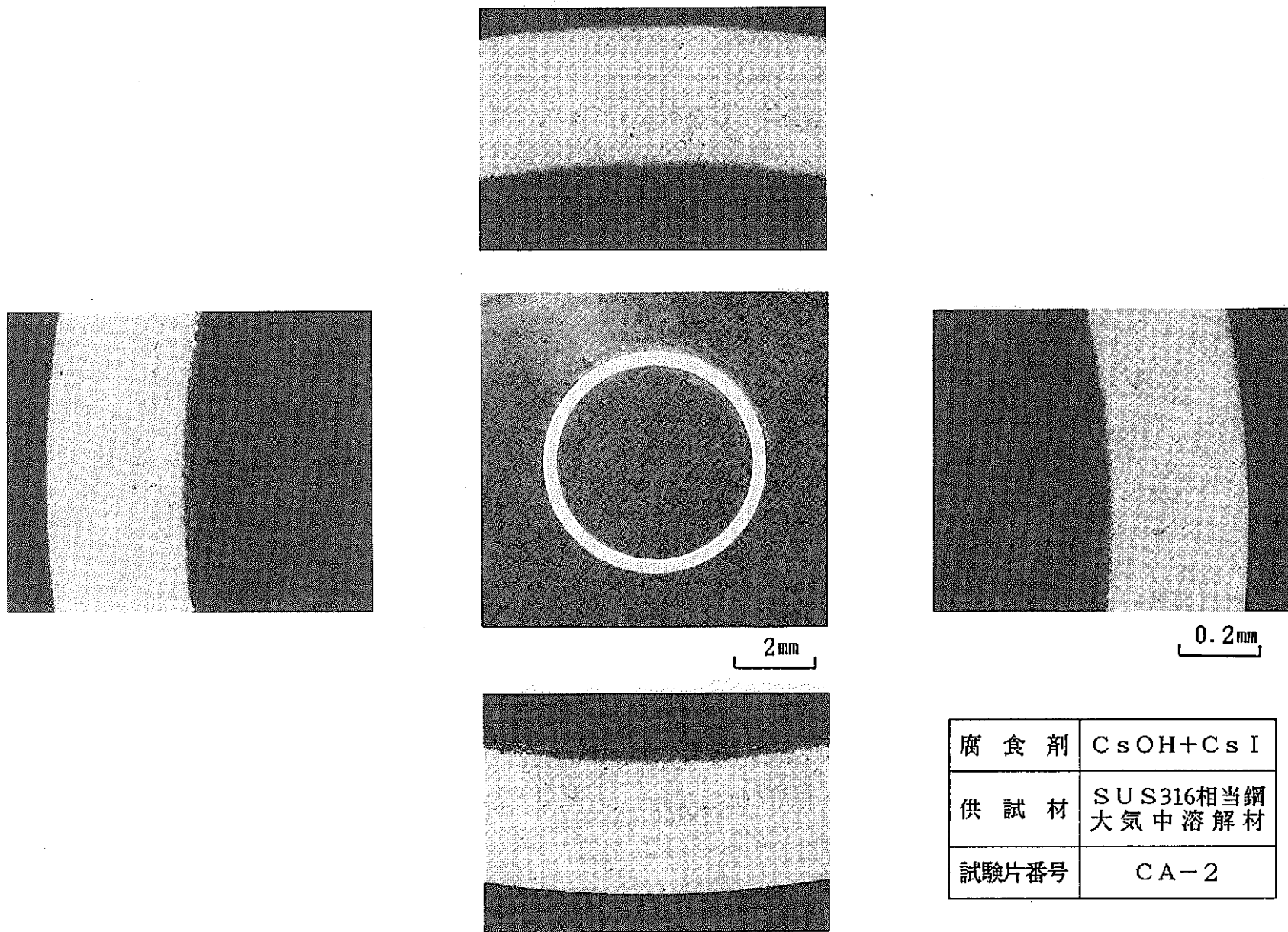
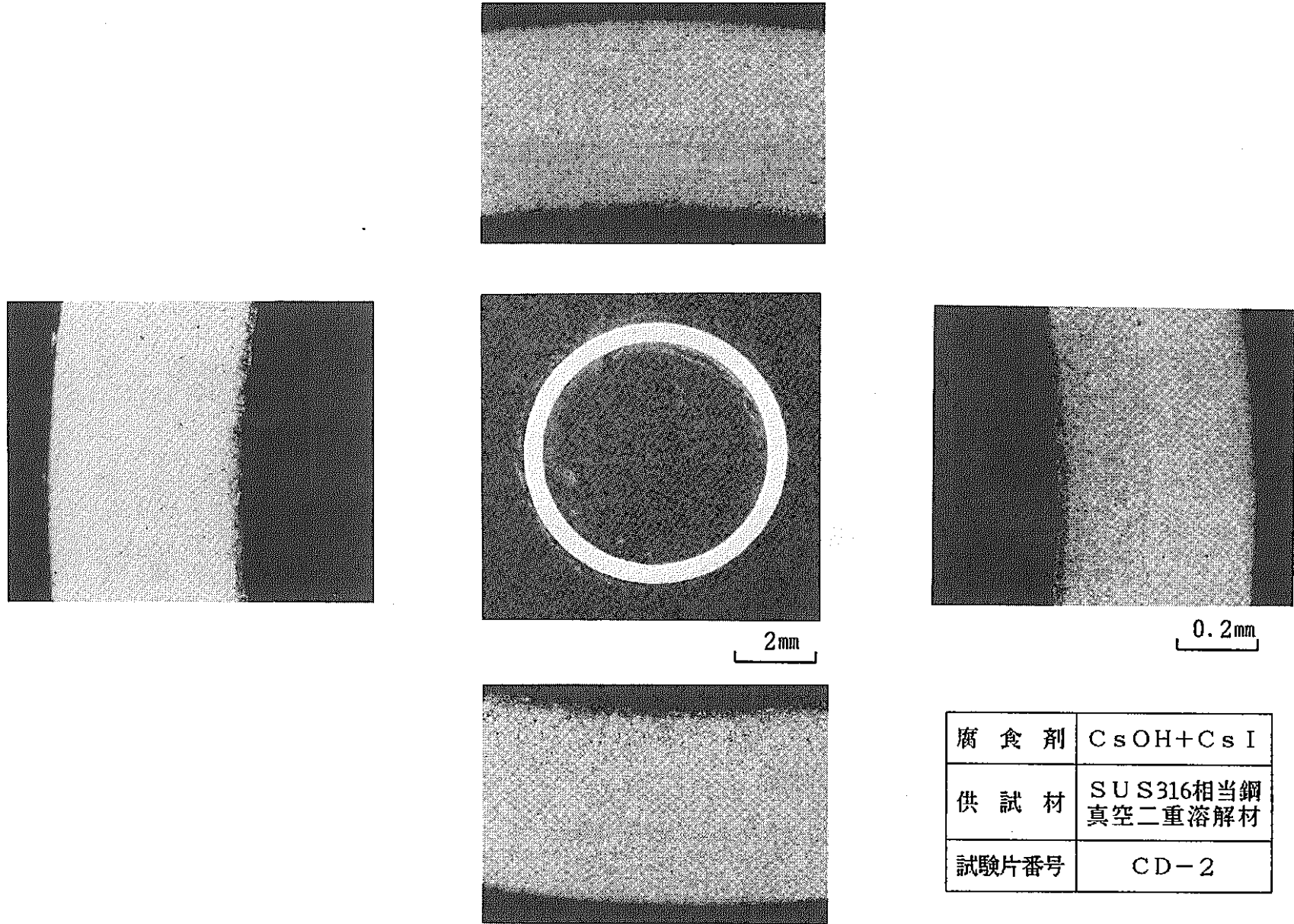


Fig.6 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with CsOH-CsI Mixture



腐食剤	CsOH+CsI
供試材	SUS316相当鋼 大気中溶解材
試験片番号	CA-2

Fig.7 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with CsOH-CsI Mixture



腐食剤	CsOH+CsI
供試材	SUS316相当鋼 真空二重溶解材
試験片番号	CD-2

Fig.8 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with CsOH-CsI Mixture

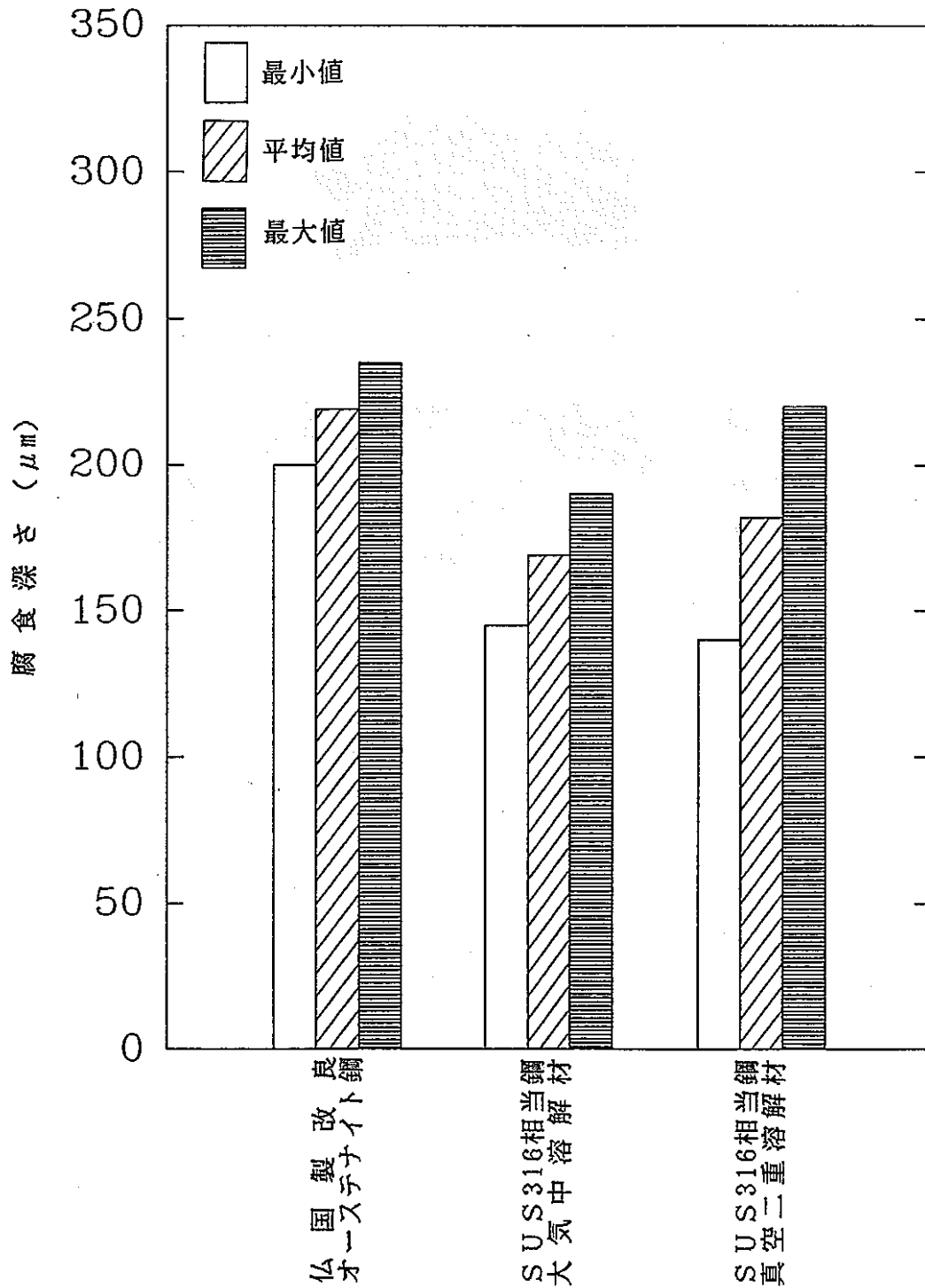


Fig.9 Comparison of Attacks Depths by CsOH-CsI Mixture

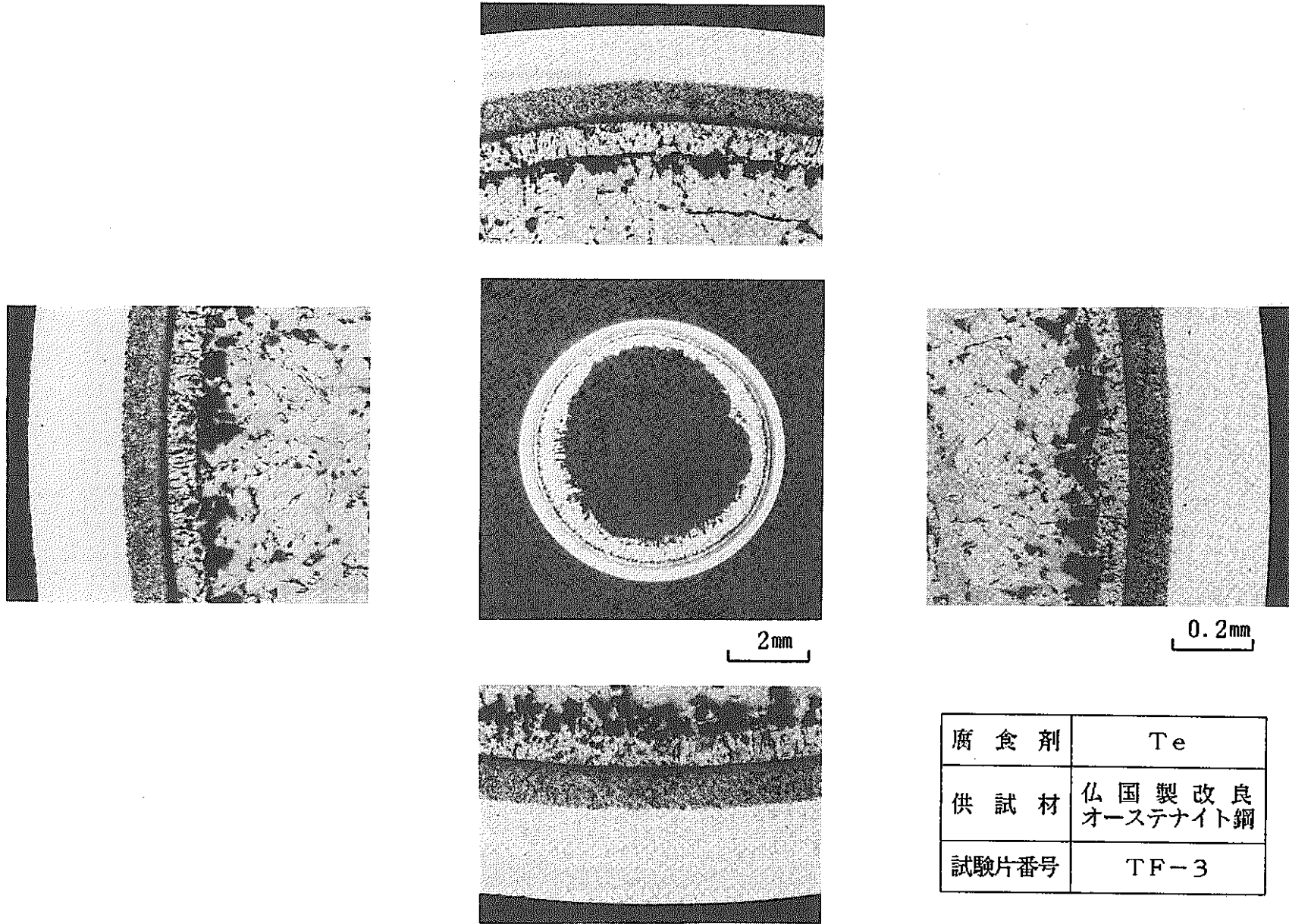
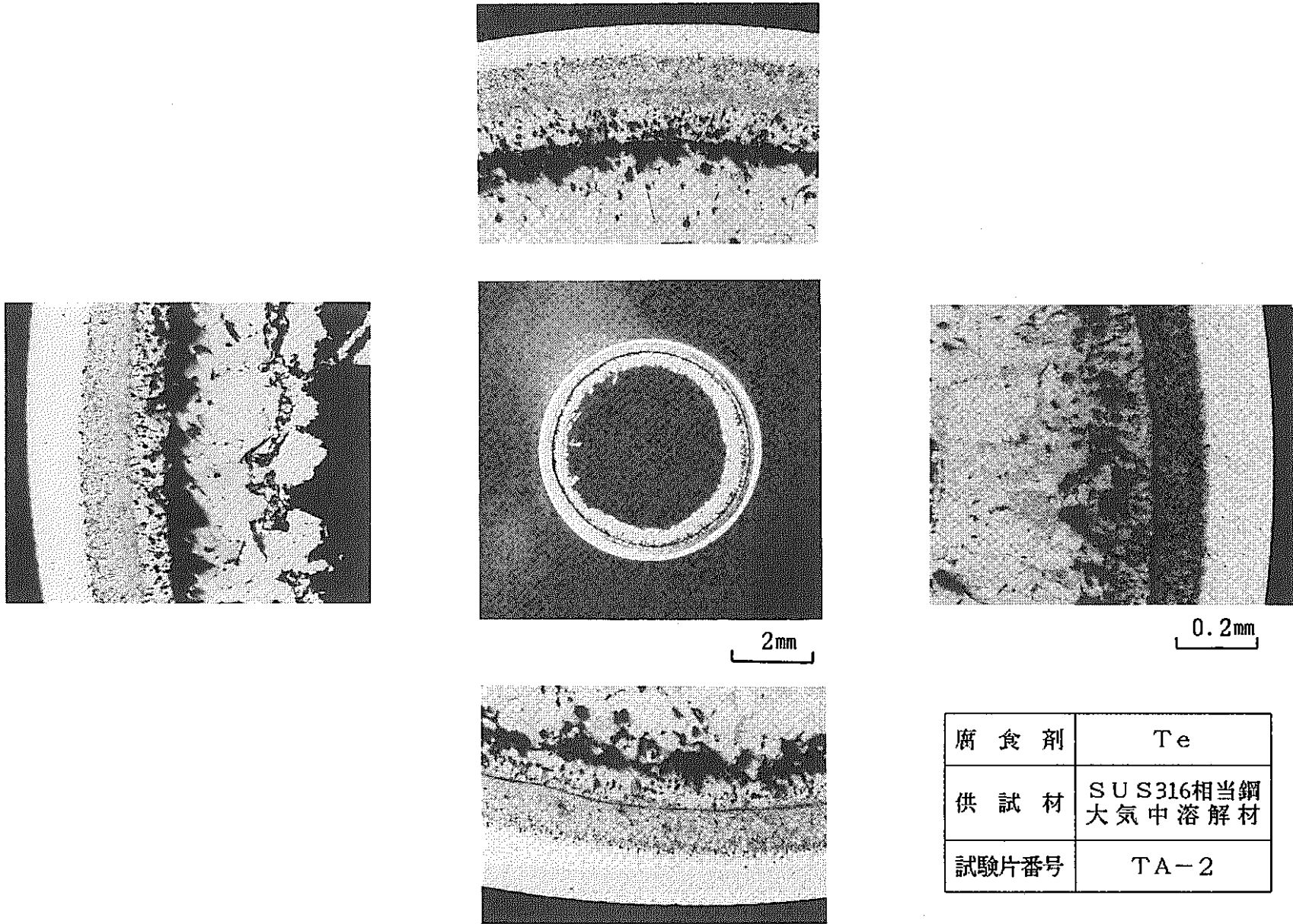
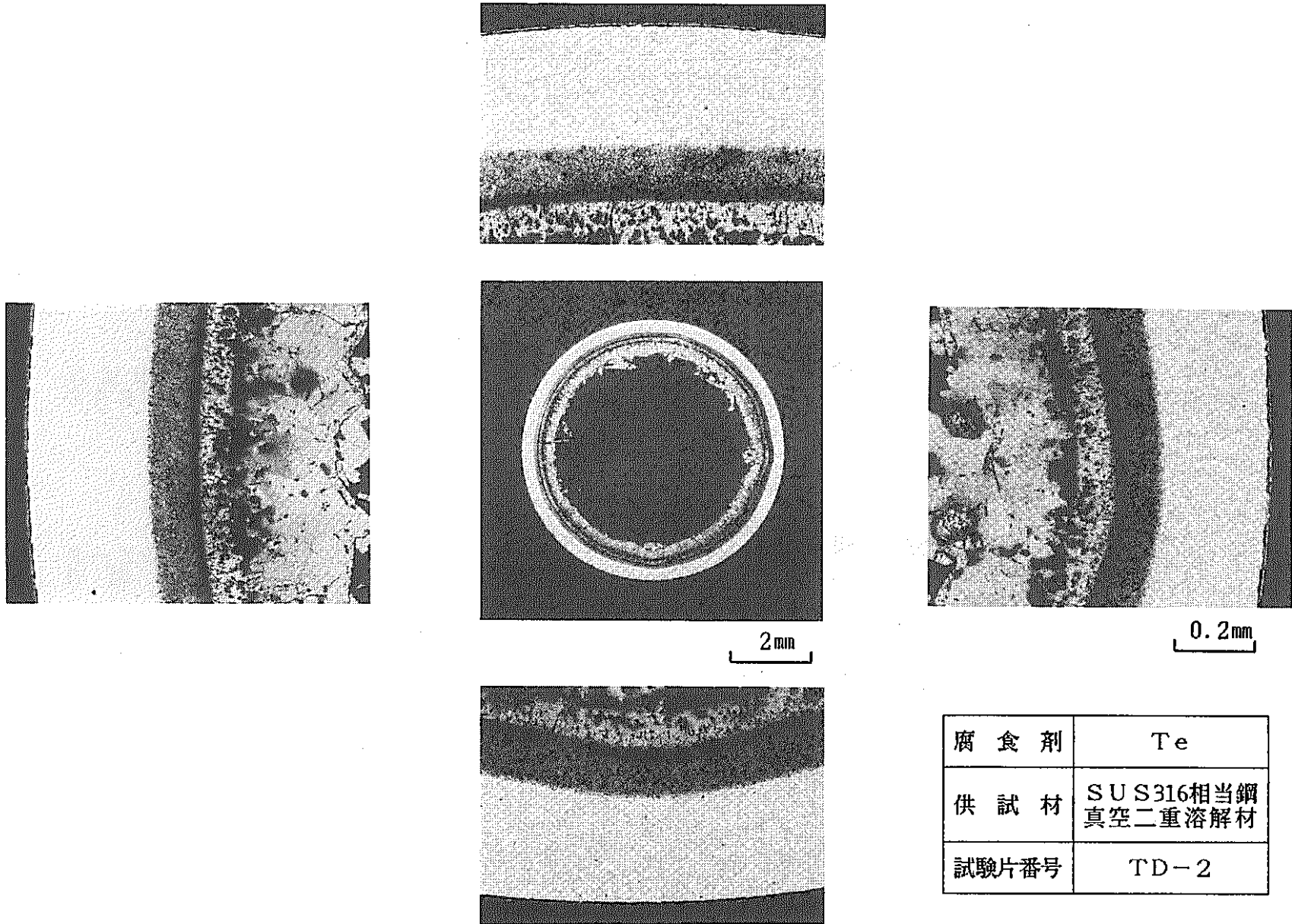


Fig.10 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with Te



腐食剤	Te
供試材	SUS316相当鋼 大気中溶解材
試験片番号	TA-2

Fig.11 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with Te



腐食剤	Te
供試材	SUS316相当鋼 真空二重溶解材
試験片番号	TD-2

Fig.12 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with Te

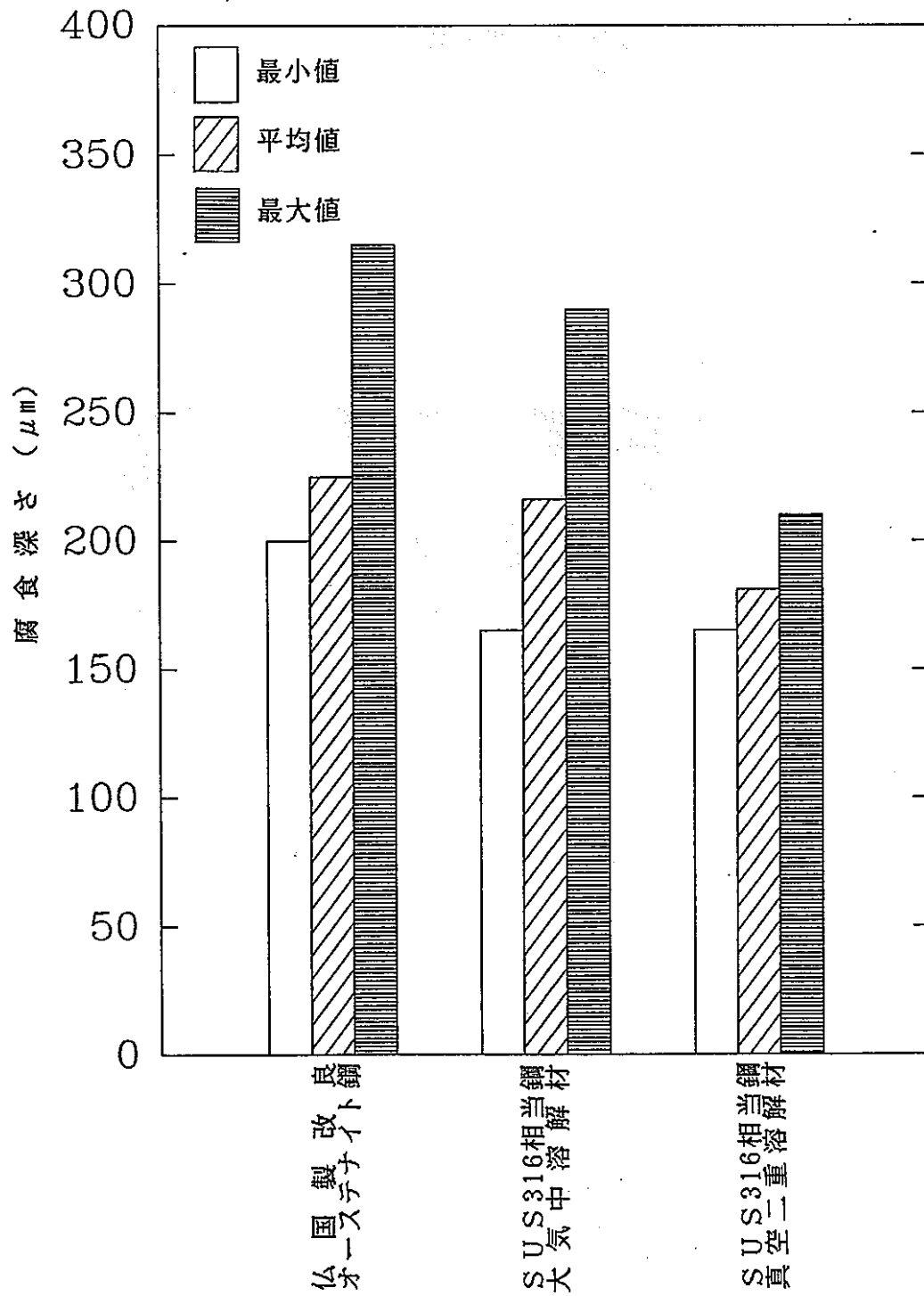


Fig.13 Comparison of Attacks Depths by Te

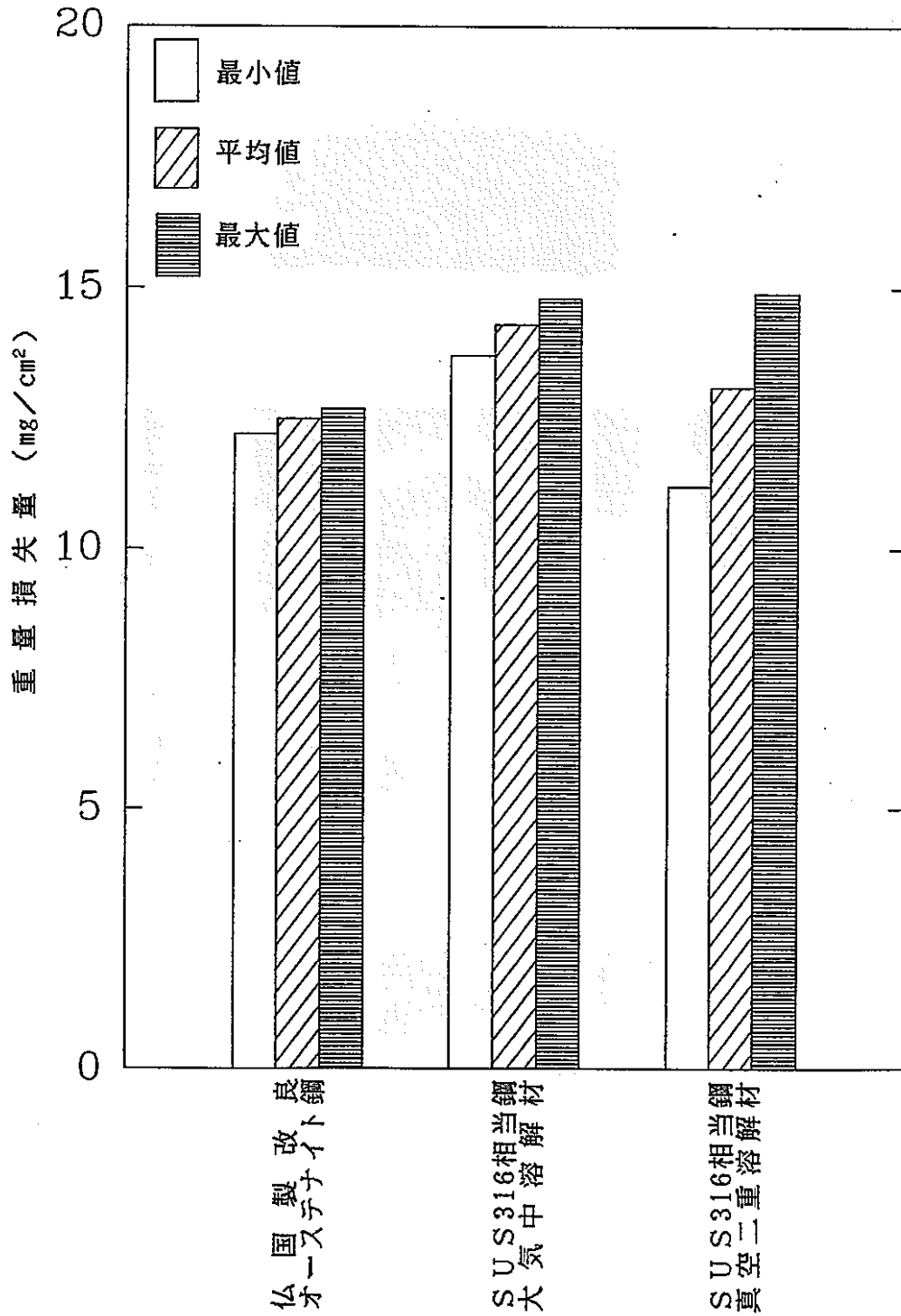
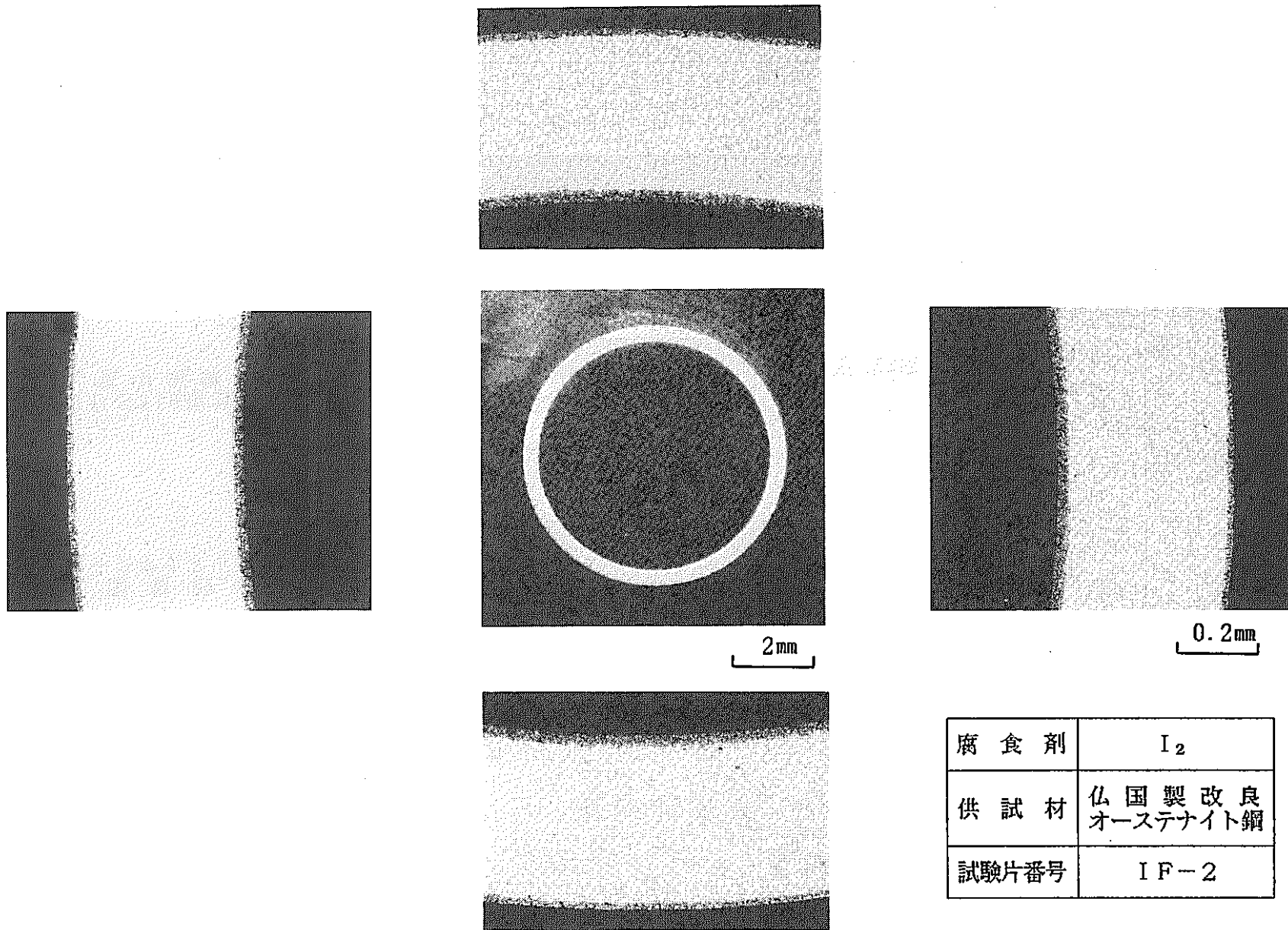
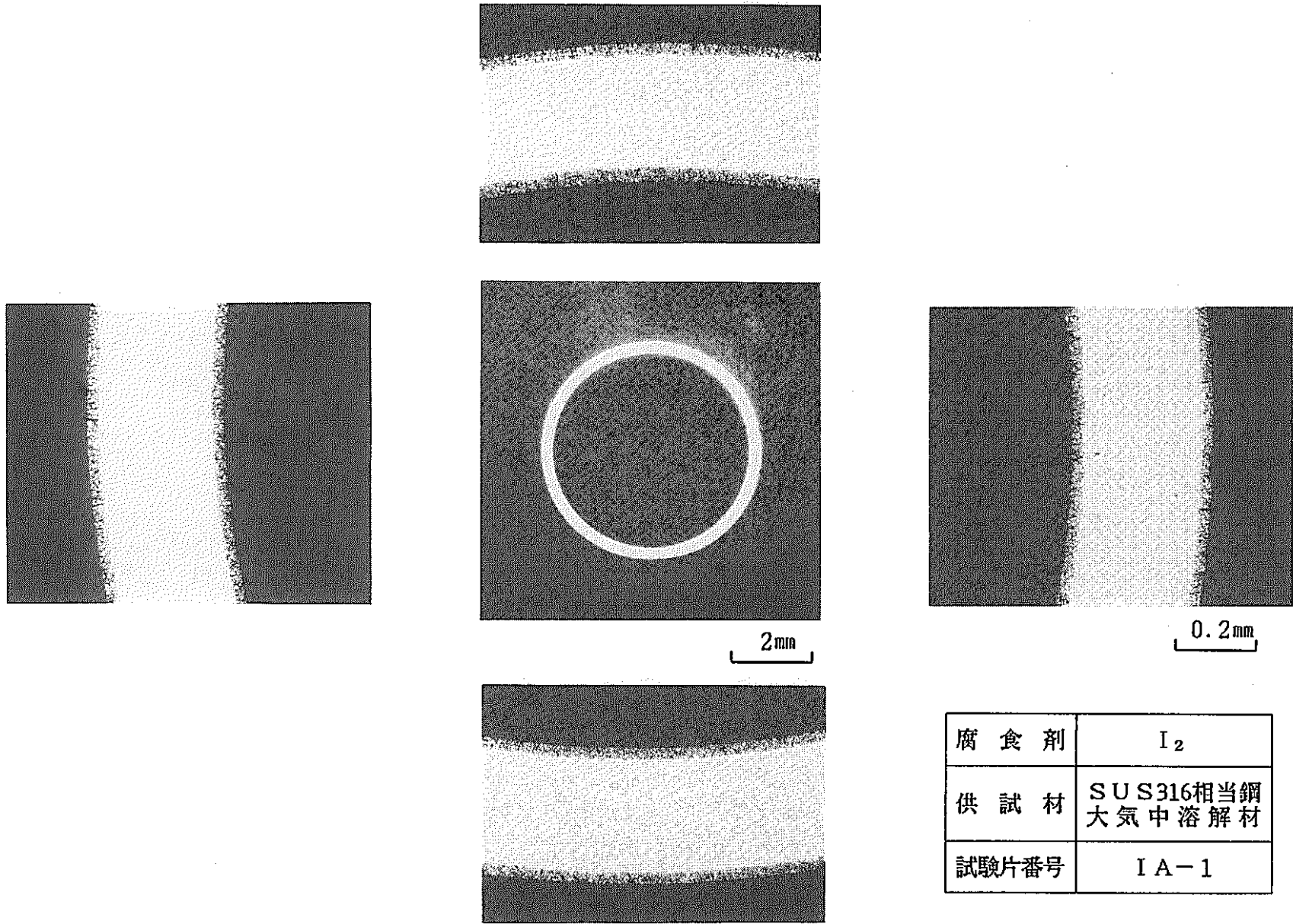


Fig.14 Comparison of Weight Loss by I₂



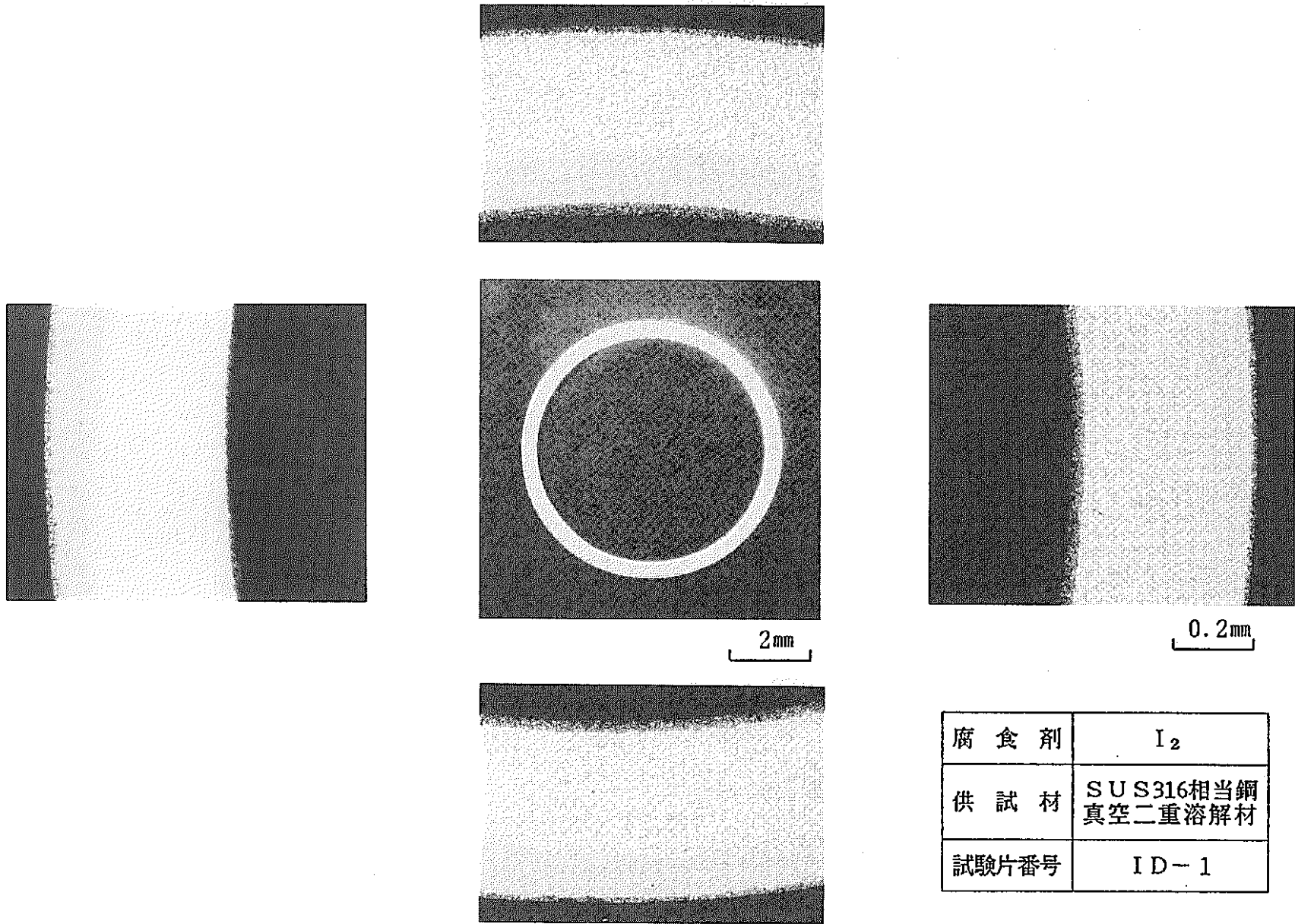
腐食剤	I ₂
供試材	仏国製改良 オーステナイト鋼
試験片番号	IF-2

Fig.15 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with I₂



腐食剤	I ₂
供試材	SUS316相当鋼 大気中溶解材
試験片番号	IA-1

Fig.16 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with I₂



腐食剤	I ₂
供試材	SUS316相当鋼 真空二重溶解材
試験片番号	ID-1

Fig.17 Micrographs of Cross Section for Specimen Reacted with I₂

4. 検討および評価

SUS316相当鋼真空二重溶解材の腐食深さまたは重量減少量（いずれも平均値）を基準として、CsOH-CsI混合物、Teおよびヨウ素に対する腐食量を比較したものをFig. 18に示す。Fig. 18で、平均値同士で比較すると腐食量相対値は0.93~1.24の範囲にあり、供試材間の3腐食剤に対する耐食性に大差ないように見える。次に、ばらつきすなわち最大値と最小値を含めて比較すると、CsOH-CsI混合物とヨウ素を腐食剤とするときは、仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材の腐食量相対値は、ほぼSUS316相当鋼真空二重溶解材のばらつきの範囲内にある。これから3供試材のCsOH-CsI混合物およびヨウ素に対する耐食性は同程度と言える。しかし、Teを腐食剤とするときは、仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材の腐食量相対値の最大値がそれぞれ1.74および1.60とSUS316相当鋼真空二重溶解材に比較して高い値になっている。このように平均値には有意差がないのに最大値が高い値になる（すなわち腐食深さの偏りが大きい）のがTeによる腐食の一般的な傾向であるのか否かをみるため、前回のデータ⁽²⁾と比較したものをFig. 19に示す。

Fig. 19で、基準値として本試験のSUS316相当鋼真空二重溶解材の平均値を用いている。本試験と前回のSUS316相当鋼真空二重溶解材は同じロットで、腐食量（平均値）の相違は2%以内である。また、試験温度および時間も同じであるが、前回の場合1供試材あたり1試験片である。なお、図中の数値は最大値と最小値の比で、この値が大きくなるほどばらつきが多いと言える。試験精度に基づく腐食深さのばらつきは、供試材の肉厚分布、温度分布および読み取り誤差に分けることができる。このうち、肉厚分布に基づくものは最大で15 μm 程度である。温度分布を5 $^{\circ}\text{C}$ とすると、これに基づく誤差は約5 μm である。また、読み取り誤差は最大で10 μm 程度ある。これらを合計すると、最大で30 μm になる。この値は、腐食深さ180 μm の場合、最大値と最小値の比で1.18となる。これから、最大値と最小値の比が1.2程度までは試験精度内で、これを越えた場合腐食深さに偏りがあると見なすことができる。

Fig. 19で最大値と最小値の比が1.2を大幅に越えて腐食深さに偏りが認められるのは、本試験の仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材と前回の15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti鋼の計3つで、残りの8つは1.2に近い値で腐食深さに偏りが少ない。これからTeによる腐食は、肉厚方向にほぼ均一に進み、腐食深さに偏りが少ないのが一般的

な傾向と言える。したがって、腐食深さに偏りが多い分仏国製改良オーステナイト鋼と SUS316相当鋼大気中溶解材は、SUS316相当鋼真空二重溶解材よりTeに対する耐食性が劣っていると見える。

本試験の仏国製改良オーステナイト鋼と前回の15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti鋼は似た化学成分を持つので、これらのCsOH-CsI、Teおよびヨウ素に対する腐食量を比較したものをFig. 20に示す。ただし、CsOH-CsIに関してはレファレンス材であるSUS316相当鋼真空二重溶解材の試作年度が本試験と前回とで異なっており⁽³⁾、また、ヨウ素に関しては試験方法が異なっているため、基準値としてそれぞれの試験に用いたSUS316相当鋼真空二重溶解材の腐食量を用いた。したがって、Te以外の腐食試験について厳密に比較することは困難であるが、3腐食剤に対する腐食特性は似た傾向を示し、また、腐食量相対値は15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti鋼のほうが全体として低めの値である。

供試材の合金成分元素であるCr、NiおよびTiの含有量と腐食量相対値との関係を参考のためFig. 21~23に示す。相関係数は比較的高い値である。しかし、平均値では3供試材間に腐食量相対値に差が少ないこと、供試材の数が3と少ないことおよびいくつかの因子が複雑に関与していると考えられることから、合金成分元素と腐食量相対値との関係について明言することはできない。

5. 結 言

仏国製改良オーステナイト鋼被覆管とSUS316相当鋼大気中溶解材を用いた被覆管のFCCI特性を把握するため、SUS316相当鋼真空二重溶解材をレファレンス材とし、CsOH-CsI混合物、Teおよびヨウ素を模擬FP腐食剤として、温度700℃、時間100hの条件で、炉外腐食試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) CsOH-CsI混合物 (CsOH/CsI=1) により、深さ140~235 μ mの粒界腐食が生じた。
- (2) Teにより、深さ165~315 μ mの全面腐食が生じた。
- (3) ヨウ素により重量減少量11.2~14.9mg/cm²の全面腐食が生じた。
- (4) 3腐食剤に対し、3供試材間で腐食形態に有為な差はなかった。
- (5) 仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材のCsOH-CsI

およびヨウ素に対する耐食性はSUS316相当鋼真空二重溶解材と同程度である。

- (6) SUS316相当鋼真空二重溶解材に比較して、仏国製改良オーステナイト鋼とSUS316相当鋼大気中溶解材のTeに対する耐食性はやや劣る。

6. 参考文献

- (1) 福田ら、「AISI316およびAISI304ステンレス鋼のヨウ素蒸気による腐食」、JAERI-M 5946 (1975)。
- (2) 富永康夫ら、「高速炉用被覆管のFCCI感受性炉外比較試験」、日立製作所、昭和59年3月。
- (3) 湯谷順明ら、「高速炉用被覆管のFCCI感受性炉外比較試験」、PNC SJ 202 85-16、日立製作所、昭和60年7月。

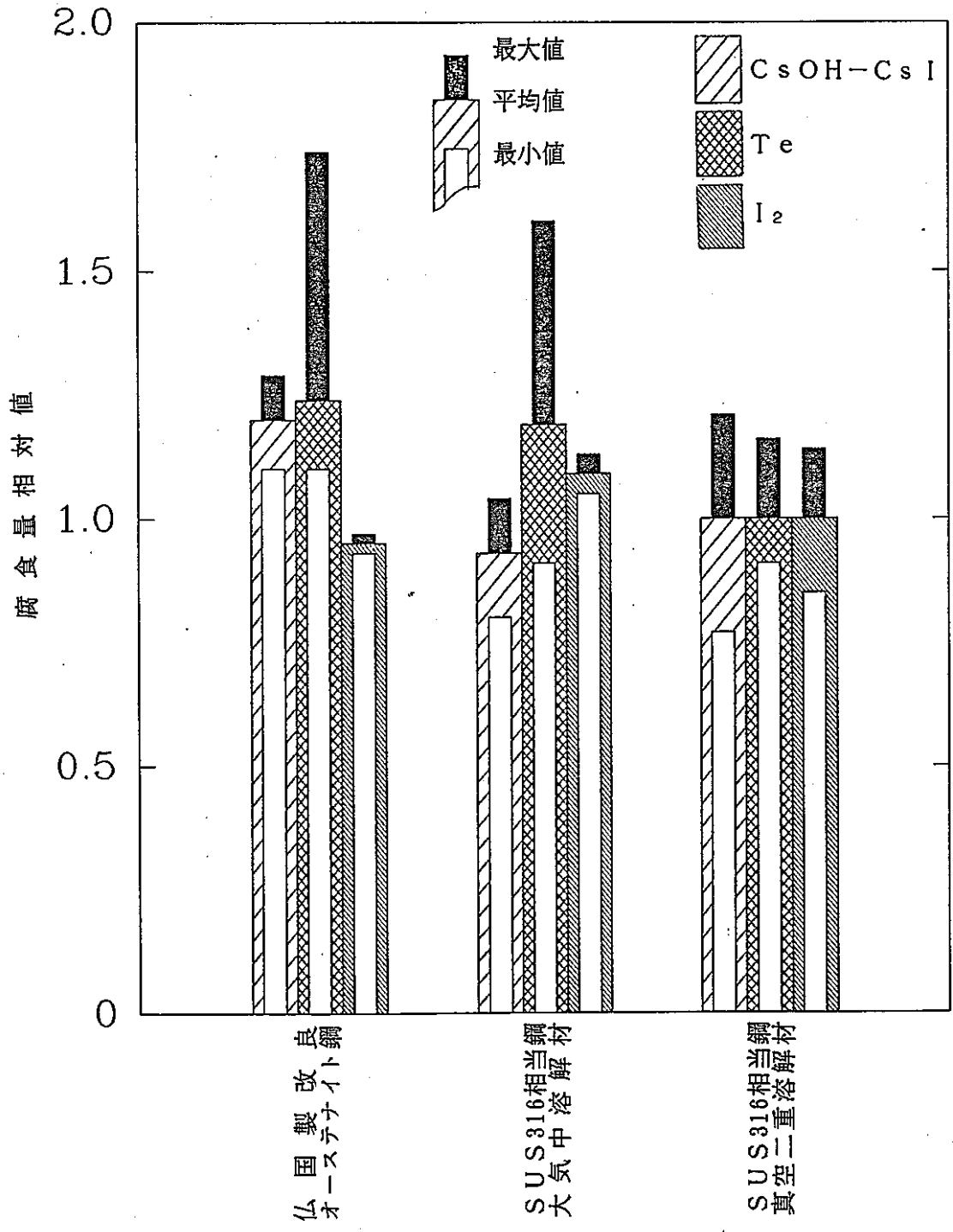


Fig. 18 Comparison of Attacks by CsOH-CsI, Te and I₂

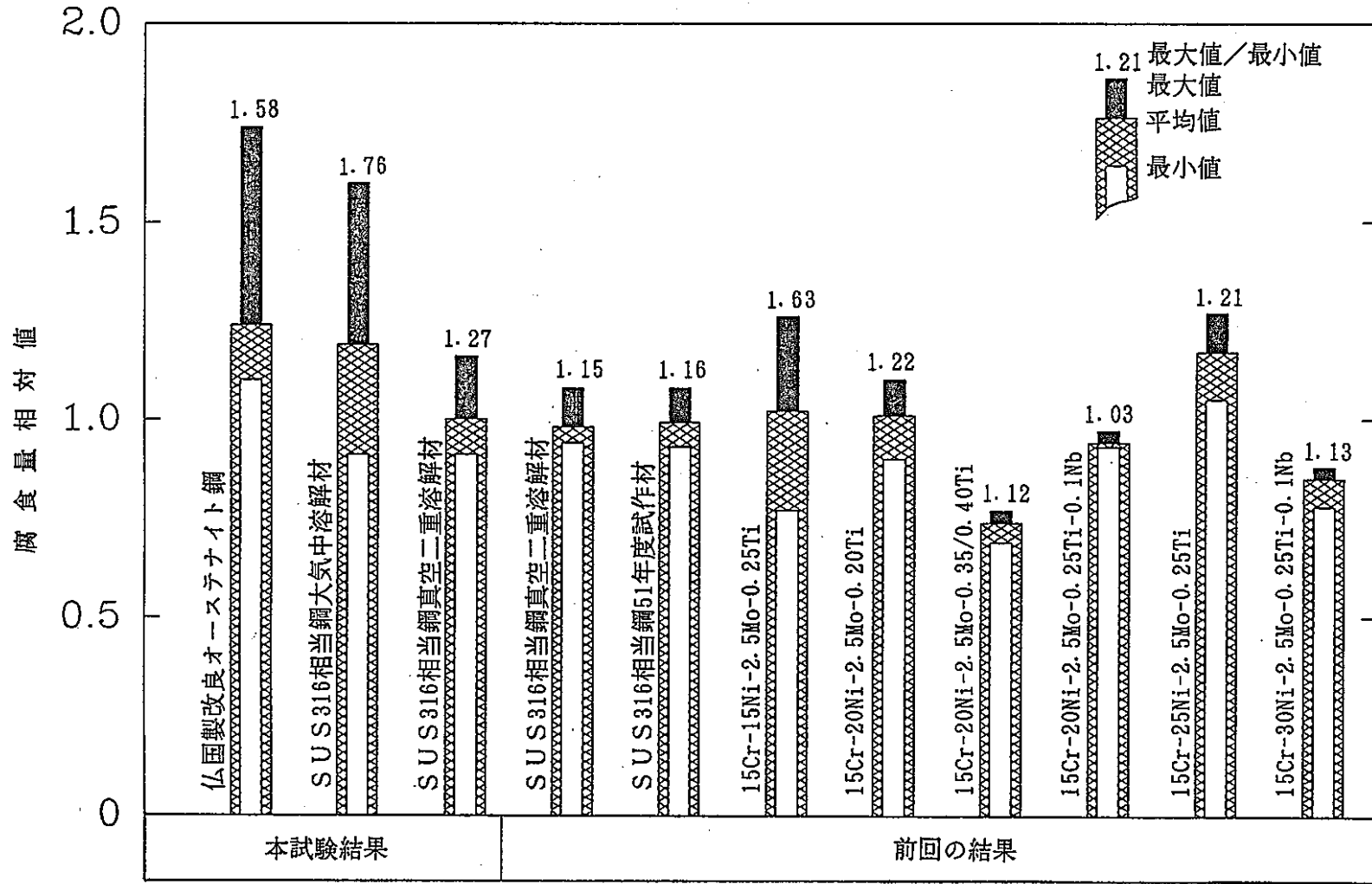


Fig. 19 Comparison with Previous Work for Attacks by Te

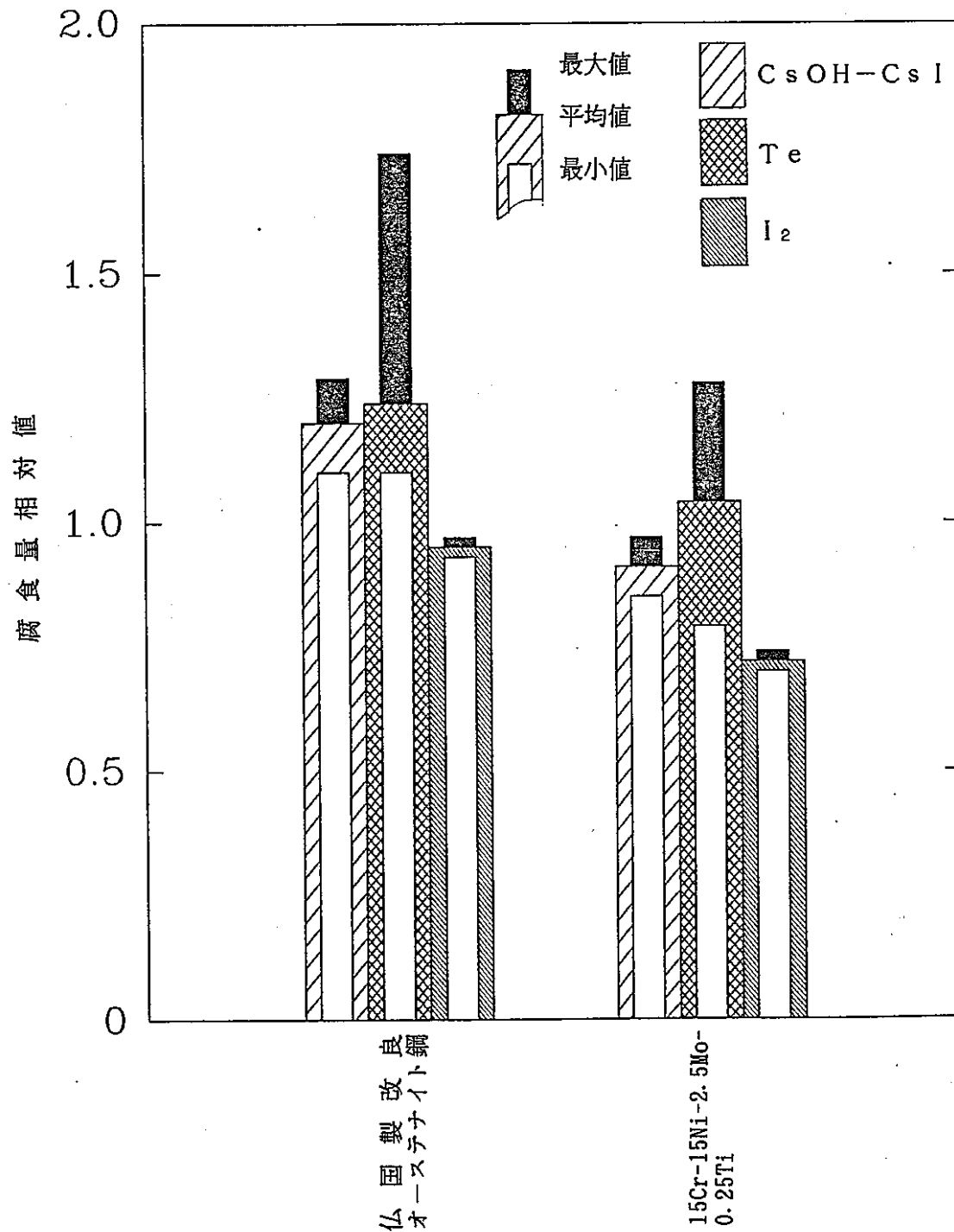


Fig. 20 Comparison of Attacks between Advanced Austenitic Stainless Steel Made in France and 15Cr-15Ni-2.5Mo-0.25Ti Steel

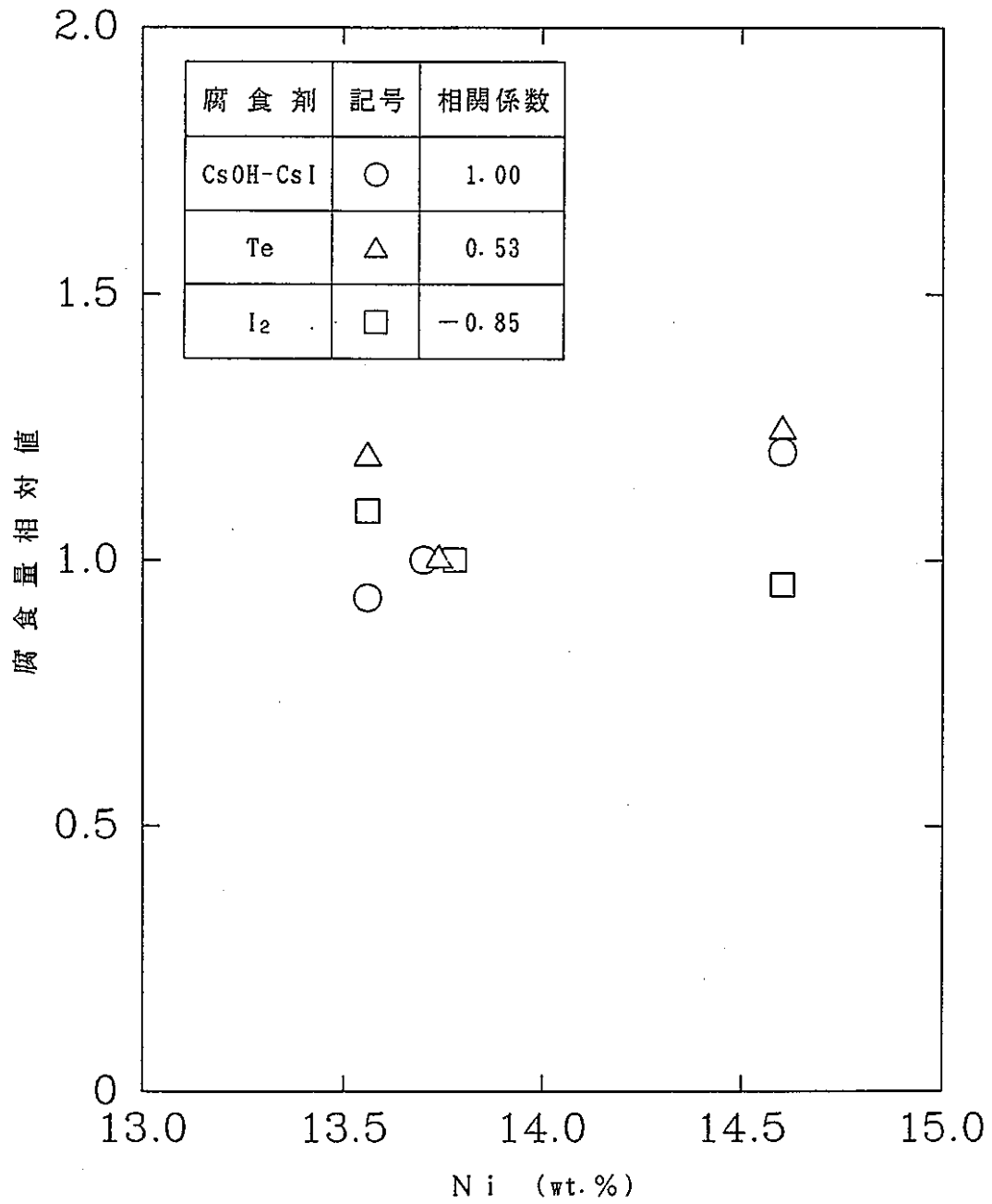


Fig. 21 Relationships between Attacks and Ni Content

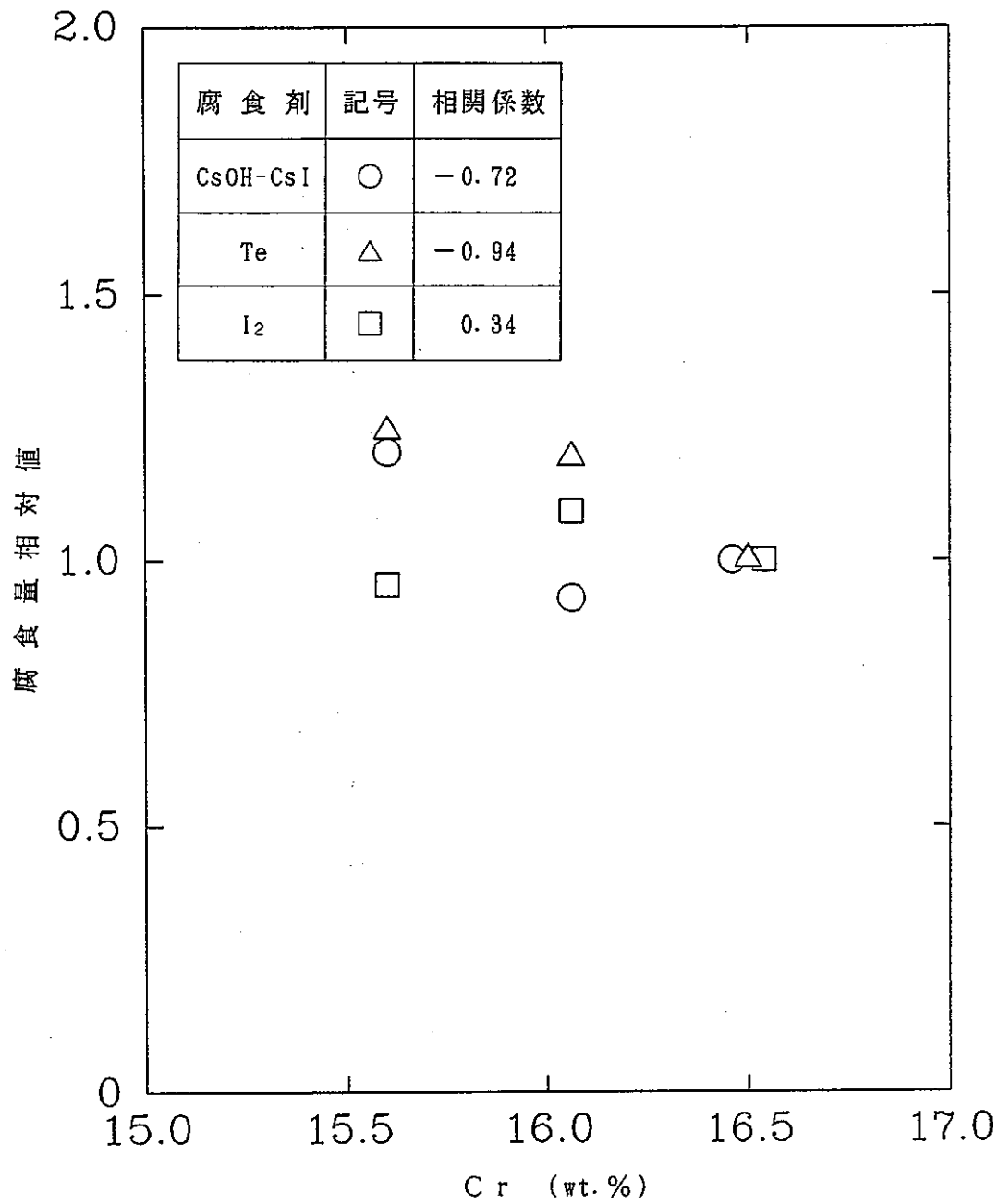


Fig. 22 Relationships between Attacks and Cr Content

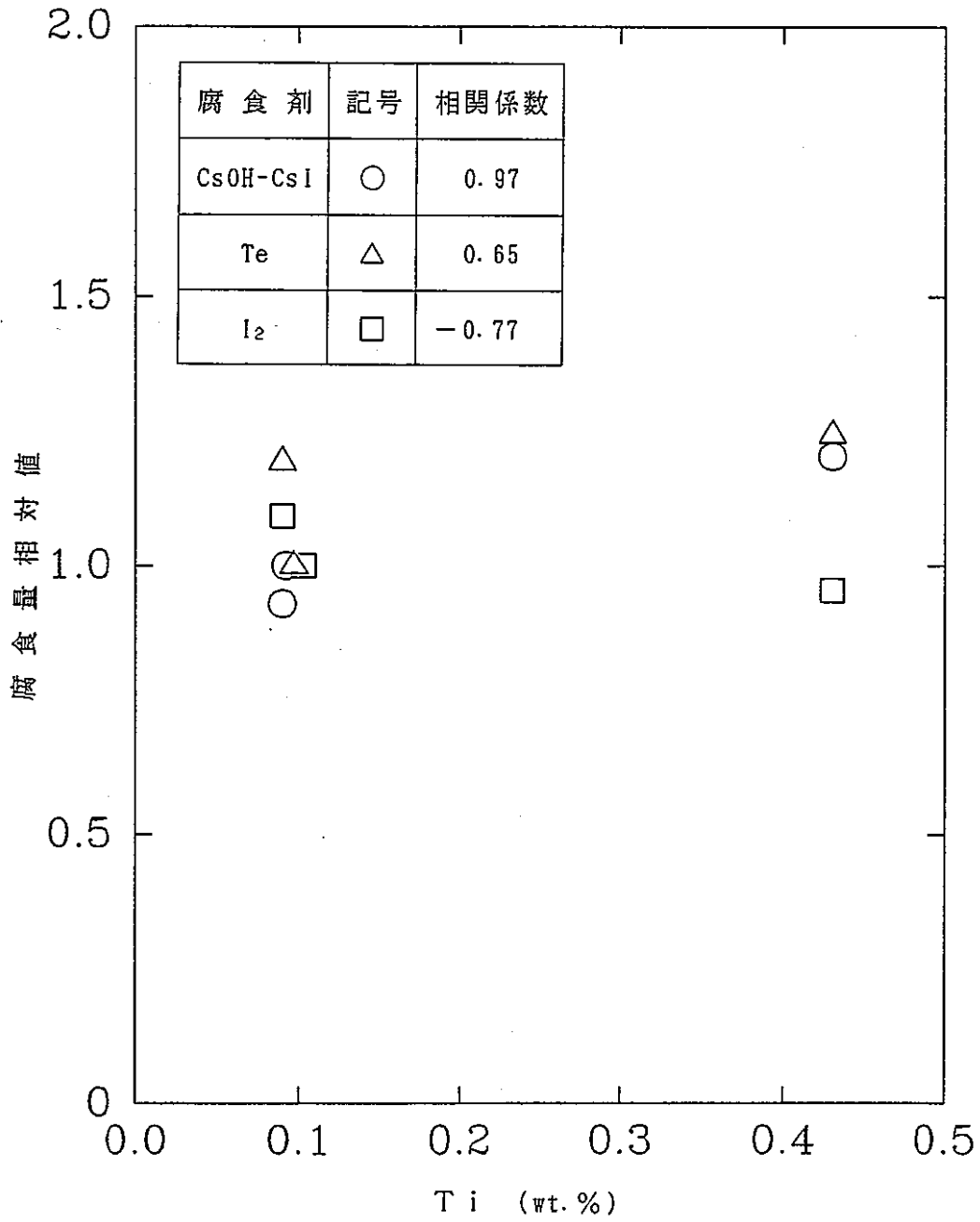


Fig. 23 Relationships between Attacks and Ti Content