

JAERI-Tech

2002-058



JP0250385



HIP法によるプラズマ対向機器用
W-Cu合金接合技術の開発(3)
—金箔を用いた接合—

2002年7月

斎藤 滋・深谷 清*・石山 新太郎

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）で複写による実費領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

HIP 法によるプラズマ対向機器用 W-Cu 合金接合技術の開発(3)
-金箔を用いた接合-

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター
斎藤 滋・深谷 清*・石山 新太郎⁺¹

(2002 年 5 月 29 日受理)

現在、ITER 等の核融合炉の設計では、ダイバータ等のアーマ材に高融点タンゲステン合金の適用が検討されている。一方、アーマ材の背後に接合されるヒートシンクには、その熱伝導率の高さや機械的特性から、無酸素銅やアルミナ分散強化銅などの銅合金が提案されている。プラズマ対向機器の製作には両者の信頼できる接合技術の開発が不可欠であり、原研では熱間等方加圧 (Hot Isostatic Pressing ; HIP) 法によるタンゲステンと銅合金の接合技術の開発を進めてきた。本研究では金箔を用いたタンゲステンと銅合金の HIP 接合試験を行い、最適な HIP 条件の選択と、引張り試験による接合強度の評価を行った。その結果、最適接合条件は 850°C・2 時間・147MPa で、金箔なしの場合よりも 150°C も低い温度で接合が可能となり、この時の接合強度は金箔なしの場合と同等であることがわかった。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

⁺¹ 大洗研究所核熱利用研究部、* 日本アドバンストテクノロジー（株）

Development of Bonding Techniques between W and Cu-alloys for Plasma Facing Components by
HIP Method (3)

-Bonding Tests with Au-foil Insert-

Shigeru SAITO, Kiyoshi FUKAYA* and Shintaro ISHIYAMA⁺¹

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 29, 2002)

In recent years, it has been considered that W (tungsten) is one of candidate materials for armor tiles of plasma facing components (PFC), like first wall or divertor, of fusion reactor. On the other hand, Cu-alloys, like OFHC-Cu or DS-Cu, are proposed as heat sink materials behind the plasma facing materials because of its high thermal conductivity. It is necessary to develop a reliable bonding techniques in order to fabricate PFC. JAERI has developed the hot isostatic press (HIP) bonding process to bond W with Cu-alloys. In this experiments, bonding tests with Au-foil insert were performed. We could get the best HIP bonding conditions for W and Cu-alloys with Au-foil as 1123K×2hours×147MPa. It was shown that the HIP temperature was 150K lower than that of without Au-foil. Furthermore, the tensile strength was similar to that of with without Au-foil.

Keywords : Plasma Facing Component, Tungsten, OFHC-Cu, DS-Cu, HIP Method, Bonding,
Au-foil Insert

⁺¹Department of Advanced Nuclear Heat Technology, Oarai Research Establishment

*Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

目 次

1. 序論	1
2. 実験方法	2
2.1 材料及び試料の準備	2
2.2 接合試験	2
2.3 接合の評価	2
2.3.1 組織観察	2
2.3.2 接合強度の評価	2
3. 結果と考察	3
3.1 接合の成否及び組織変化	3
3.1.1 タングステンと無酸素銅の接合	3
3.1.2 タングステンとアルミナ分散強化銅の接合	3
3.1.3 無酸素銅を用いたタングステンとアルミナ分散強化銅の接合	3
3.2 接合強度の評価	4
4. まとめ	5
謝辞	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Materials and Preparation of Samples	2
2.2 Bonding Tests	2
2.3 Evaluation of Bonding	2
2.3.1 Metallographic Observation	2
2.3.2 Evaluation of Bonding Strength	2
3. Results and Discussion	3
3.1 Results and Metallographic Observation	3
3.1.1 Bonding Tests on W and OFHC-Cu	3
3.1.2 Bonding Tests on W and DS-Cu	3
3.1.3 Bonding Tests on W and DS-Cu with OFHC-Cu Disk	3
3.2 Evaluation of Bonding Strength	4
4. Conclusion	5
Acknowledgment	5
References	6

This is a blank page.

1. 序論

現在、ITER 等の核融合炉の設計では、プラズマ対向材料として高融点タングステン合金の検討が行われている[1]。タングステン合金は、高融点であること、燃料であるトリチウムによるインベントリーの問題が少なく[2]、かつ炉内補修の際の遮蔽効果などの利点を持ち、ダイバータ等のアーマ材に上記材料の適用が検討されている。一方、アーマ材の背後に接合されるヒートシンク材としては、その熱伝導率の高さや機械的特性[3]から、無酸素銅（Oxygen Free High conductivity Copper ; OFHC-Cu）やアルミナ分散強化銅（Dispersion Strengthened Copper ; DS-Cu）などの銅合金が提案されている。しかし、プラズマ対向機器は、高熱負荷や中性子照射による熱応力や照射損傷の影響により、母材ならびに接合強度の低下あるいは接合部の破断が予想される。したがって、プラズマ対向機器の製作には、両者の信頼できる接合技術の開発が不可欠である。原研では熱間等方加圧（Hot Isostatic Pressing ; HIP）法によるタングステンと銅合金の接合技術の開発を進めてきた。HIP 法は等方的に圧力を加えるために接合強度や寸法精度に優れる他、異種材料の接合や大型（数 m 程度）機器の製作や立体面の接合にも適用可能な点でも他の接合方法に比べて優れている。例えば核融合関連では、プランケット構造材である SUS316L とヒートシンクの DS-Cu の HIP 接合技術の開発が進められている[4-6]。

タングステンと銅合金の接合に関しては、タングステンと無酸素銅の接合[7-8]や、タングステンとアルミナ分散強化銅の接合技術の開発を行ってきた[9-10]。本研究では、より低温での接合と接合の健全性の向上を実現するために、金箔を用いたタングステンと銅合金の HIP 接合試験を行った。タングステンと銅は完全な非固溶系であるのに対し、金は Fig. 1.1(a)及び 1.1(b)の状態図[11]に示すように、タングステンと銅のいずれに対しても全率固溶する。従つて、金はタングステンと銅合金の接合に用いる間挿材として最適であると考えられる。

2. 実験方法

2.1 材料及び試料の準備

本研究では(株)日本タンクステン製のタンクステン試料を用いた。本試料は粉末焼結法で製造され、純度 99.9%以上である。無酸素銅は(株)日立電線製で純度 99.99%以上である。アルミナ分散強化銅は SCM メタル製の AL-25 を用いた。本試料はアルミナを約 0.25wt% 含有し、機械的特性、特に高温における強度が無酸素銅に比べて大幅に改善されている[3]。金箔はニラコ製で厚さは公称 $20\mu\text{m}$ である。

各材料の不純物分析値を Table 2. 1 に示す。また、各材料の機械的特性及び物性値を Table 2. 2 に示す。各材料とも直径 20mm、高さ 25mm の円柱形状に加工して接合試験用試料とし、軟鋼製の容器（キャップセル）に電子ビーム溶接で真空封入した。

2.2 接合試験

HIP 接合試験は、KOBELCO 製の“Dr.HIP”を用いて行った。圧媒ガスには高純度 Ar ガスを用いた。HIP 接合温度は Fig. 1. 1(b)に示す Au-Cu 系の状態図から 900°C 以下とした。保持時間は 2 時間、HIP 圧力は 147MPa とした。接合条件の一覧を Table 2. 3 に示す。

2.3 接合の評価

2.3.1 組織観察

接合部の組織観察は、微小硬さ試験、金相観察を行った。まず、HIP 処理を終えた試験体を Fig. 2. 1 に示すように 2 つに切断した。一方は樹脂埋め、鏡面研磨の後、エッチングを行って金相観察用試料とした。エッティング液の成分は過酸化水素水とアンモニア水である。タンクステン及び銅合金に対するエッティング液の混合比を Table 2. 4 に示す。ピッカース硬さ試験の荷重は 0.1N、保持時間は 15 秒とした。また、マイクロスコープで接合部近傍を観察した。

2.3.2 接合強度の評価

接合した試料の接合強度は、引張り試験で評価した。引張り試験には Fig. 2. 2 に示す板状試験片を用いた。試験温度は室温、200°C、400°C 及び 600°C とした。雰囲気は真空 ($<2.0 \times 10^{-2}\text{Pa}$) とした。クロスヘッドの変位速度は 0.5mm / min、試験本数は各条件 1 ~ 2 本とした。また、試験片の破断面を実体顕微鏡で観察し、破断位置の確認を行った。

3. 結果と考察

3.1 接合の成否及び組織変化

3.1.1 タングステンと無酸素銅の接合

Table 3. 1 にタングステンと無酸素銅の接合試験の結果を示す。タングステンと無酸素銅（以下 W/Au/OF）は、147 MPa、2 時間の条件では、HIP 温度が 750°C から 850°C の範囲ではいずれも接合したが、900°C では金の溶融により接合しなかった。熱電対位置と試料の間に温度差があるものと考えられる。無酸素銅母材は Table 3. 2 に示すように、再結晶化により結晶粒は粗大化し、また大きく軟化している。接合部のマイクロスコープ写真と微小硬さ分布を Fig.3. 1～3. 3 に示す。接合界面には未接合部やボイドは見られなかった。金箔の厚さは公称 20 μm であるが、実際には 60 μm 程度であった。また、接合界面に硬い反応層の形成も見られなかった。

3.1.2 タングステンとアルミナ分散強化銅の接合

Table 3. 1 にタングステンとアルミナ分散強化銅（以下 W/Au/DS）は、147 MPa、2 時間の条件では、HIP 温度が 850°C 及び 880°C では接合したが、800°C 以上では接合しなかった。アルミナ分散強化銅母材は Table 3. 3 に示すように、再結晶化はしておらず、硬さもほとんど変化していない。接合部のマイクロスコープ写真と微小硬さ分布を Fig.3. 4～3. 5 に示す。接合界面には未接合部やボイド、あるいは硬い反応層の形成などは見られなかった。また、接合界面のアルミナ分散強化銅側に約 80 μm 程度の変色部が見られた。金が拡散した領域ではないかと考えられる。

3.1.3 無酸素銅を用いたタングステンとアルミナ分散強化銅の接合

以上の結果から、金箔を用いた場合の最適 HIP 接合温度は 850°C とした。従って、厚さ 1mm の無酸素銅を用いた接合試験は 850°C、147 MPa、2 時間の 1 条件のみ行った。Table 3. 4 に厚さ 1mm の無酸素銅を用いたタングステンとアルミナ分散強化銅の接合試験の結果を示す。金箔の挿入位置がタングステンと無酸素銅の界面のみの場合（以下 W/Au/OF/DS）と、無酸素銅とアルミナ分散強化銅の界面にも入れた場合（以下 W/Au/OF/Au/DS）の 2 通りの試験を行い、いずれの試験体とも接合した。無酸素銅母材は Table 3. 5 に示すように、再結晶化により結晶粒は粗大化し、大きく軟化したが、アルミナ分散強化銅母材は再結晶化しておらず、硬さもほとんど変化していない。接合部のマイクロスコープ写真と微小硬さ分布を Fig.3. 6～3. 7 に示す。各接合界面には未接合部やボイド、あるいは硬い反応層の形成などは見られなかった。W/Au/OF/DS では Au/OF 界面の無酸素銅側に約 30 μm の変色部が見られた。W/Au/OF/Au/DS では Au/OF 界面の無酸素銅側に約 30 μm、Au/DS 界面のアルミナ分散強化銅側に約 100 μm の変色部が見られた。

3.2 接合強度の評価

W/Au/OF/DS と W/Au/OF/Au/DS の接合強度を引張り試験によって評価した。以下に結果と考察を述べる。

引張り試験の結果を Table 3. 6 に、引張り強度の試験温度依存性を Fig. 3. 8 にそれぞれ示す。試験温度が 200°C 以上の場合は、1000°C で HIP 処理した無酸素銅母材の強度[7, 8]をやや上回り、金箔なしで接合した試料 (1000°C, 147MPa, 2 時間) [9, 10] とほぼ同じであることがわかった。一方、試験温度が室温ではこのどちらをも下回った。

また、W/Au/OF/DS の破断面の実体顕微鏡写真を Fig. 3. 9(a)～3. 9(d) に、W/Au/OF/Au/DS の破断面を Fig. 3. 10(a)～3. 10(d) にそれぞれ示す。いずれの試料でも試験片の破断位置は、試験温度が室温及び 200°C の場合は W/Au/OF 接合界面の W 側で破断した。接合界面の W 側で破断するのは、円柱試料の切り出し時の機械加工の影響で表面近傍が脆くなつたためと考えられる。一方、試験温度が 400°C 及び 600°C の場合は W/Au/OF 接合界面で破断した。正確な破断位置が W/Au 界面か、Au/OF 界面か、あるいは Au 内であるかは不明である。

4.まとめ

金箔を用いて、タンクステンと銅合金の HIP 接合試験を行い、最適 HIP 条件の選定と接合材の組織変化や接合強度を調べた。その結果、以下の事が明らかとなった。

(1)タンクステンと無酸素銅は、HIP 温度 750℃から 850℃の範囲では接合したが、900℃では金箔の溶解により接合しなかった。一方、タンクステンとアルミナ分散強化銅は、HIP 温度 850℃と 880℃では接合したが、800℃では接合しなかった。以上からタンクステンと無酸素銅及びアルミナ分散強化銅の最適接合条件は 850℃、2 時間、147MPa であると言える。

(2)厚さ 1mm の無酸素銅と金箔を用いた場合、タンクステンとアルミナ分散強化銅は 850℃、147MPa、2 時間の条件で接合した。これは金箔なしの場合に比べると、150℃も低い温度である。

(3)この接合体の引張り強度は、試験温度が 200℃以上の場合は、1000℃で HIP 処理した無酸素銅母材の強度をやや上回り、金箔なしで接合した試料 (1000℃、147MPa、2 時間) とほぼ同じであることがわかった。

(4)試験片の破断位置は、試験温度が室温及び 200℃の場合は W/Au/OF 接合界面の W 側で破断した。接合界面の W 側で破断するのは、円柱試料の切り出し時の機械加工の影響で表面近傍が脆くなつたためと考えられる。一方、試験温度が 400℃及び 600℃の場合は W/Au/OF 接合界面で破断した。

謝辞

本研究を行うに当たり、多くの援助と助言を頂きました旧高温材料強度研究室室長衛藤基邦氏（現ワシントン事務所所長）、核融合工学部プランケット工学研究室室長秋場正人氏、核融合工学部 NBI 加熱研究室の佐藤和義氏ならびに原子力エンジニアリングの大山剛氏と森順二氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] ITER, ITER EDA Documentation Series, No.7, IAEA, Vienna(1996).
- [2] T. Tanabe, N. Noda and H. Nakamura, J. Nucl. Mater, 196-198, 11(1992).
- [3] S. Ishiyama, K. Fukaya, M. Eto and M. Akiba, "The characterization of copper alloys for the application of fusion reactors", Ame. Soc. Mech. Eng., (1995)545-550.
- [4] A. Lind, J. Collen, H. Englund, C. G. Hjorth and D. Zick, "Hipped PM structural parts for fusion development", Powder Metall., Vol.39, No.4 (1996)248-249.
- [5] G. Le Marois, Ch. Dellis, J. M. Gentzbittel and F. Moret, " HIP'ing of copper alloys and stainless steel", J. Nucl. Mater., Vol.233-237(1996)927-931.
- [6] S. Sato, T. Kuroda, T. Kurasawa, K. Furuya, I. Togami and H. Takatsu, "Mechanical properties of HIP bonded joints of austenitic stainless steel and Cu-alloys for fusion experimental reactor blanket", J. Nucl. Mater., Vol.233-237(1996)940-944.
- [7] S. Saito, K. Fukaya, S. Ishiyama, M. Eto, K. Sato and M. Akiba, Proceeding of 20th Symposium on Fusion Technology, Marseille, France, 1998.
- [8] S. Saito, K. Fukaya, S. Ishiyama, M. Eto and M. Akiba, JAERI Research 99-049.
- [9] S. Saito, K. Fukaya, S. Ishiyama, M. Eto and M. Akiba, JAERI Research 2000-006.
- [10] S. Saito, K. Fukaya, S. Ishiyama, and K. Sato, Proceeding of 10th International Conference on Fusion Rector Materials, Baden-Baden, Germany, 2001.
- [11] T. B. Massalski, et. al., Binary Alloy Phase Diagrams 2ed., ASM Int., Materials Park, OH.

Table 2. 1 Chemical composition of tested materials (ppm).

Element	W	Cu	Al	Li	Na	Mg	Fe	Si	Co
tungsten	99.987 (wt%)	—	<2	<50	<1	<1	10	<5	<0.48

Element	Cu	Al	B	Pb	Fe
OFHC-Cu	99.99 (wt%)	—	—	—	—
DS-Cu (AL25) (SCM metal)	99.39 (wt%)	2500	170	7	13

Element	Au	Ag	Cu	Fe	Pd	Pt	Zn	Cd	Pb
Au foil	99.98 (wt%)	2	2	6	5	20	2	0.1	0.1

Table 2. 2 Mechanical and thermal properties of materials.

		0.2% Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Thermal expansion coefficient (1/K×10 ⁻⁶)
tungsten	20°C	-	740	5.25
	200°C	-	736	5.35
	400°C	-	-	-
	600°C	680	710	5.70
	800°C	608	640	5.80
	1000°C	408	540	-
OFHC-Cu	20°C	26	207	15.4
	200°C	20	155	16.6
	400°C	16	91	18.3
	600°C	13	38	20.0
	800°C	7.5	18	21.6
	1000°C	-	-	-
DS-Cu (AL25) (SCM metal)	20°C	355	435	15.94
	200°C	-	-	16.95
	300°C	214	250	17.66
	400°C	-	-	17.91
	500°C	123	140	18.52
	600°C	-	-	18.71
	800°C	-	-	19.34
	1000°C	-	-	-

Table 2. 3 Tested HIP bonding conditions of W and Cu-alloys with Au-foil.

Temp. (°C)	W / Au / OF	W / Au / DS-Cu	W / Au / OF / DS	W / Au / OF / Au / DS
750	147MPa 2hours	—	—	—
800	147MPa 2hours	147MPa 2hours	—	—
850	147MPa 2hours	147MPa 2hours	147MPa 2hours	147MPa 2hours
880	147MPa 2hours	147MPa 2hours	—	—
900	147MPa 2hours	—	—	—

Table 2. 4 Composition of etchant for bonded W and Cu-alloys.

Chemicals	Volume
10%H ₂ O ₂	10 m l
NH ₄ OH	25 m l
Refined water	25m l

Table 3. 1 Results of HIP bonding tests on W and Cu-alloys with Au-foil.

Temp. (°C)	W / Au /OF	W / Au /DS-Cu
750	○	—
800	○	×
850	○	○
880	×	○
900	×	—

(pressure and hold time were fixed 147MPa and 2hours, respectively)

Table 3. 2 Results of metallographic obserbations of bonded W and OFHC-Cu.

	750°C (OA-4) W/Au/OF	800°C (OA-1) W/Au/OF	850°C (OA-2) W/Au/OF
Hardness of OFHC-Cu (micro HV) as-received : 100.9±2.4	57.1±1.9	61.0±2.0	63.1±0.7
Recrstilization of OFHC-Cu	○	○	○

Table 3. 3 Results of metallographic obserbations of bonded W and DS-Cu with Au-foil.

	850°C (DA-2) W/Au/DS	880°C (DA-3) W/Au/DS
Hardness of DS-Cu(micro HV) as-received :133.0±2.0	136.1±2.0	137.1±2.6
Recrstilization of DS-Cu	×	×

Table 3. 4 Results of HIP bonding tests on W and DS-Cu with OFHC-Cu disk and Au-foil.

Temp. (°C)	W / Au /OF / DS	W / Au /OF/ Au / DS
850	○	○

(pressure and hold time were fixed 147MPa and 2hours, respectively)

Table 3. 5 Results of metallographic obserbations of bonded W and DS-Cu with OFHC-Cu disk and Au-foil.

	850°C (DA-5) W/Au/OF/DS	850°C (DA-6) W/Au/OF/Au/DS
Hardness of DS-Cu(micro HV) as-recieved :133.0±2.0	135.0±1.3	134.7±1.3
Recrystlization of DS-Cu	×	×
Recrystlization of OFHC-Cu disk	○	○

Table 3. 6 The results of tensile tests on W / Cu-alloy bonded specimens.

(1) DA-5 (W / Au /OF / DS)

Temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Displacement (mm)	Fracture position
RT	128.0	~0	W/OF Wside
200	138.7	~0	W/OF Wside
400	98.1	~0	W/OF
400	81.8	~0	W/OF
600	32.1	~0	W/OF
600	53.7	~0	W/OF

(2) DA-6 (W / Au /OF / Au / DS)

Temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Displacement (mm)	Fracture position
RT	126.7	~0	W/OF Wside
200	146.8	~0	W/OF Wside
400	87.0	~0	W/OF
400	89.7	~0	W/OF
600	38.3	~0	W/OF
600	47.9	~0	W/OF

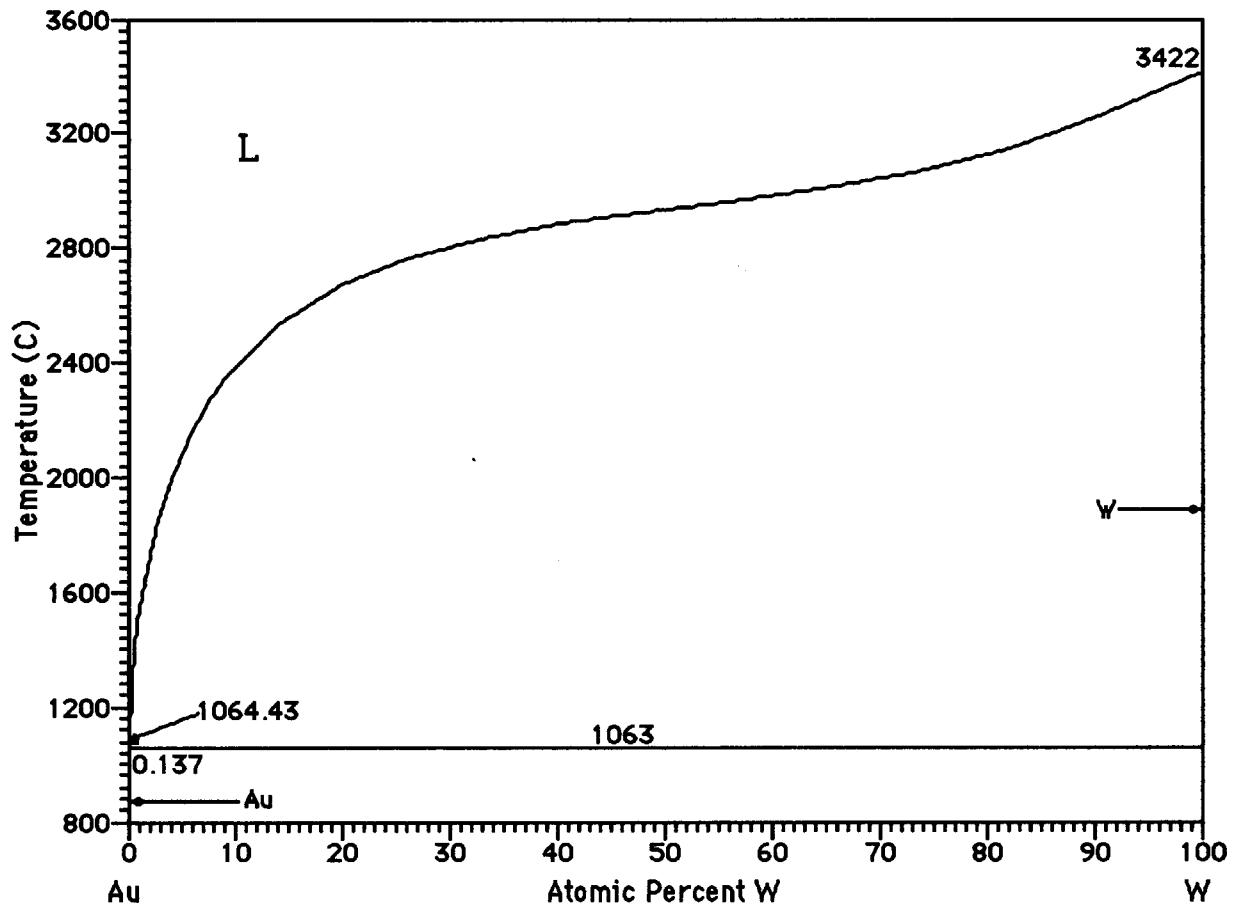


Fig. 1. 1 (a) Phase diagram for the Au-W system.

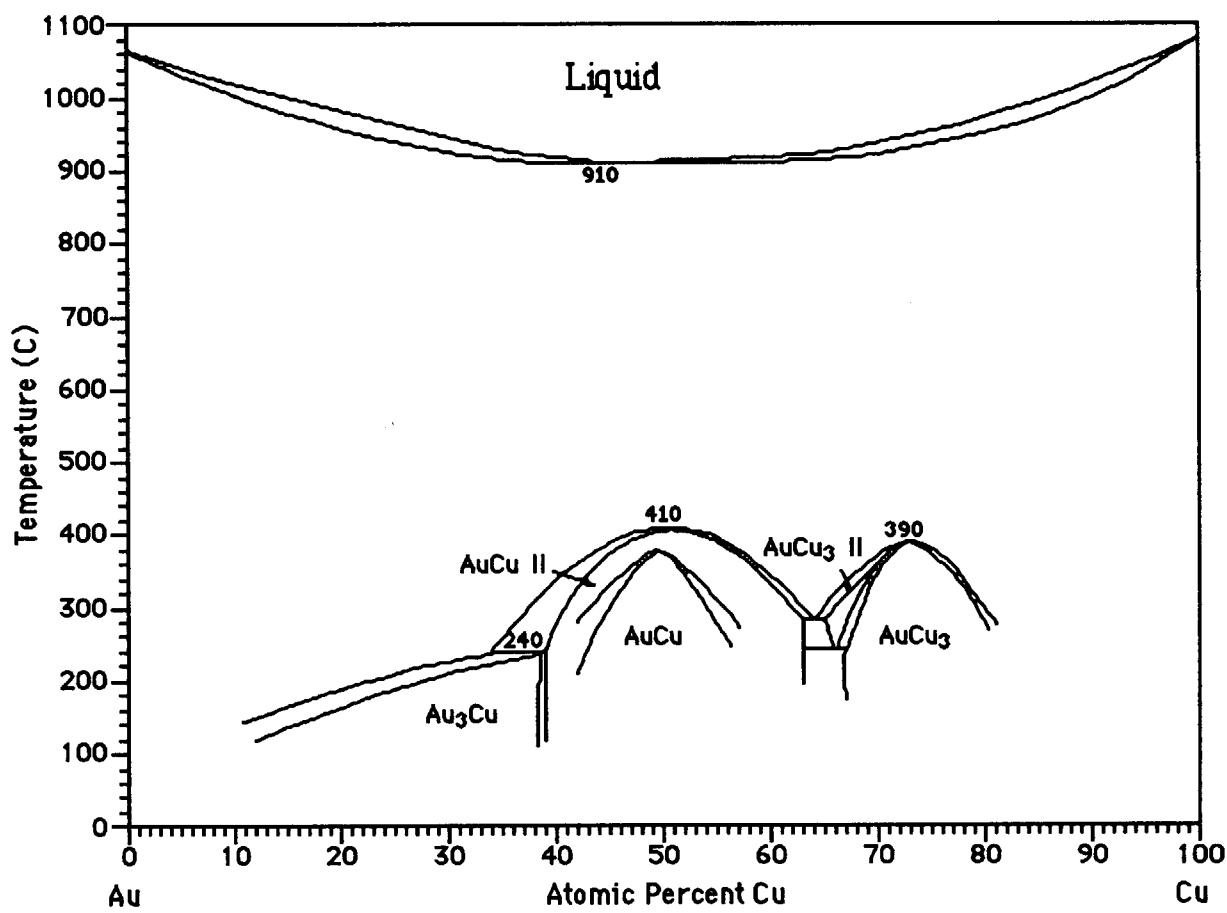


Fig. 1. 1 (b) Phase diagram for the Au-Cu system.

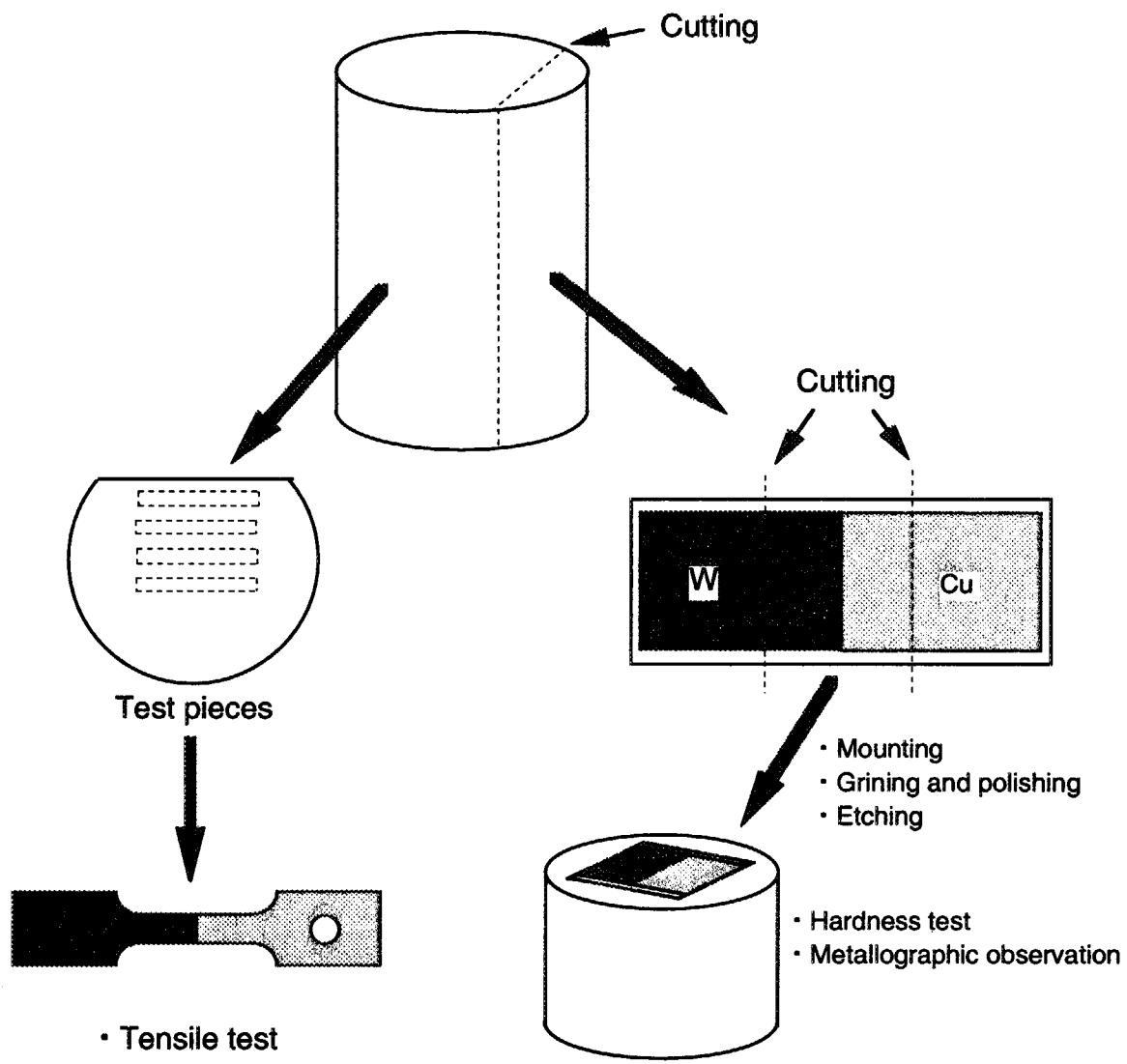


Fig. 2. 1 Evaluation process of bonded specimens.

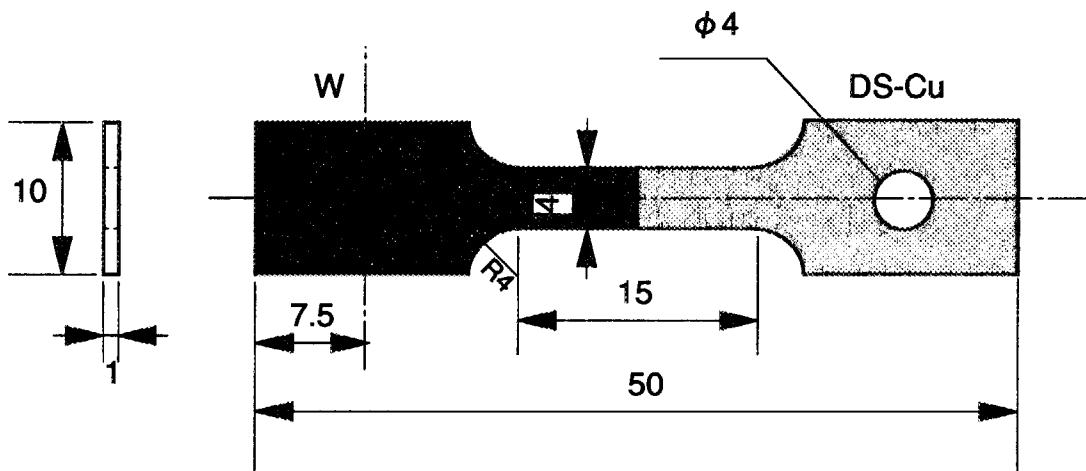


Fig. 2. 2 Test piece for tensile test.

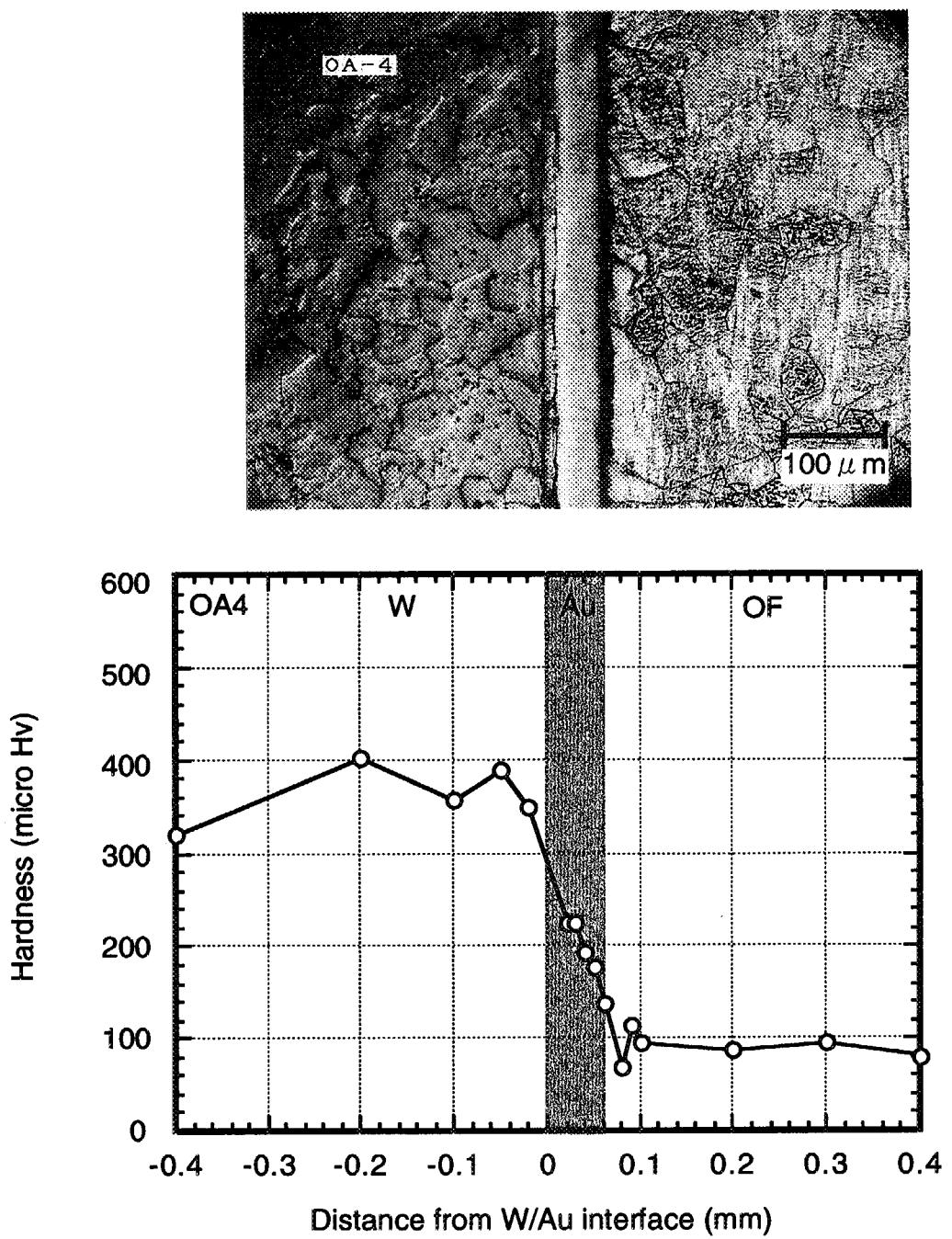


Fig. 3. 1 Hardness distribution around the interface between W and OFHC-Cu (750°C × 147MPa × 120min).

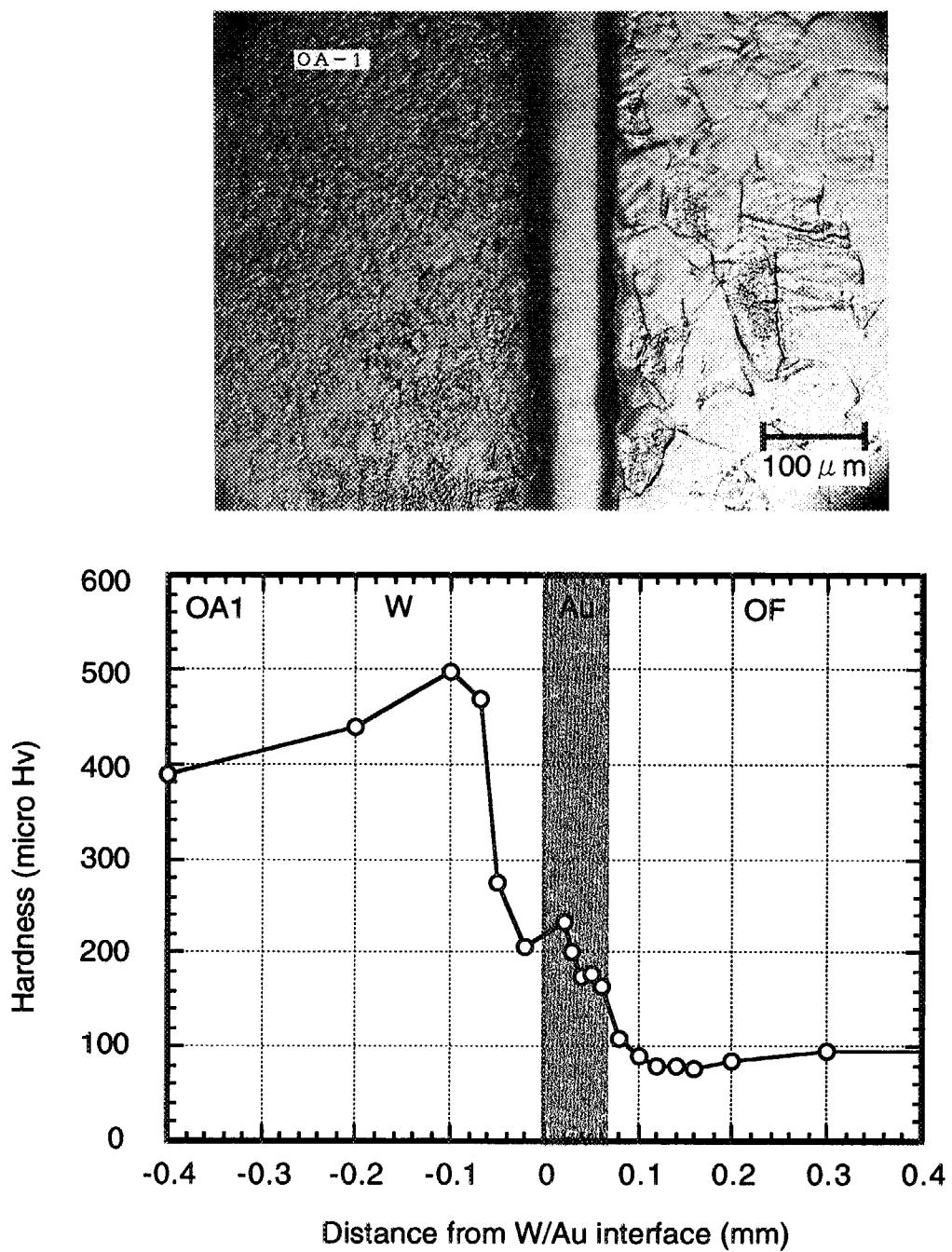


Fig. 3.2 Hardness distribution around the interface between W and OFHC-Cu (800°C × 147MPa × 120min).

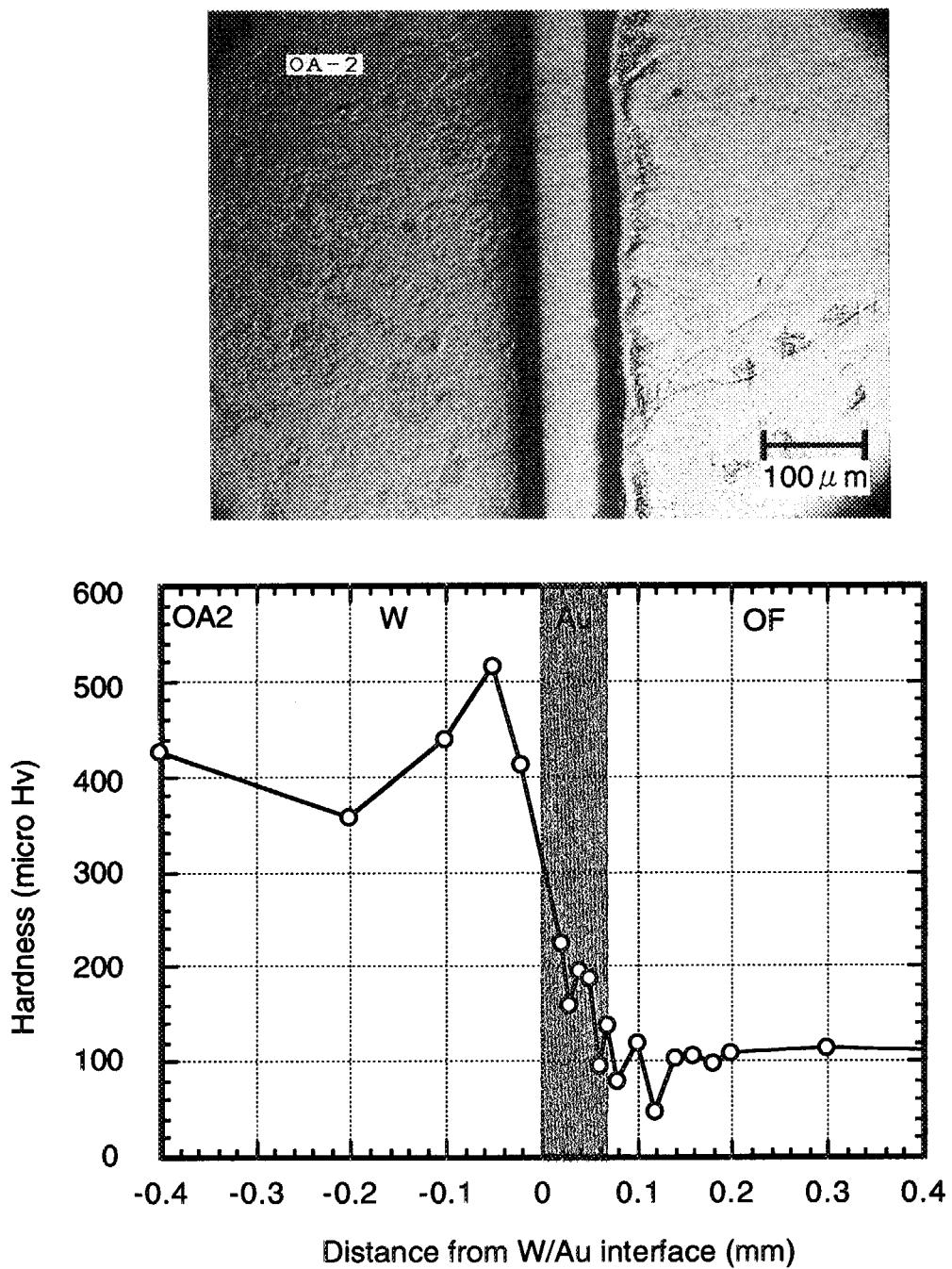


Fig. 3. 3 Hardness distribution around the interface between W and OFHC-Cu (850°C × 147MPa × 120min).

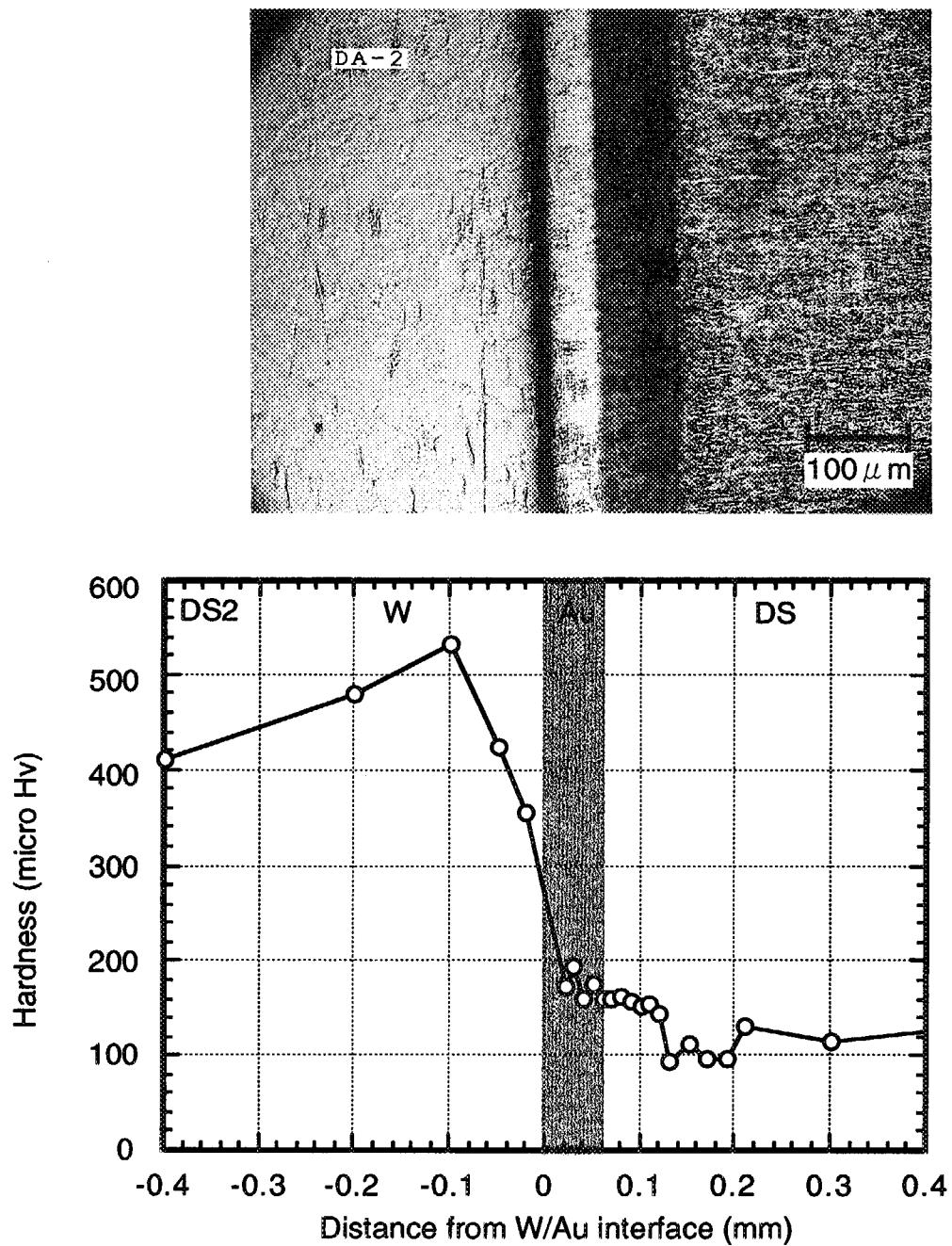


Fig. 3.4 Hardness distribution around the interface between W and DS-Cu (850°C × 147MPa × 120min).

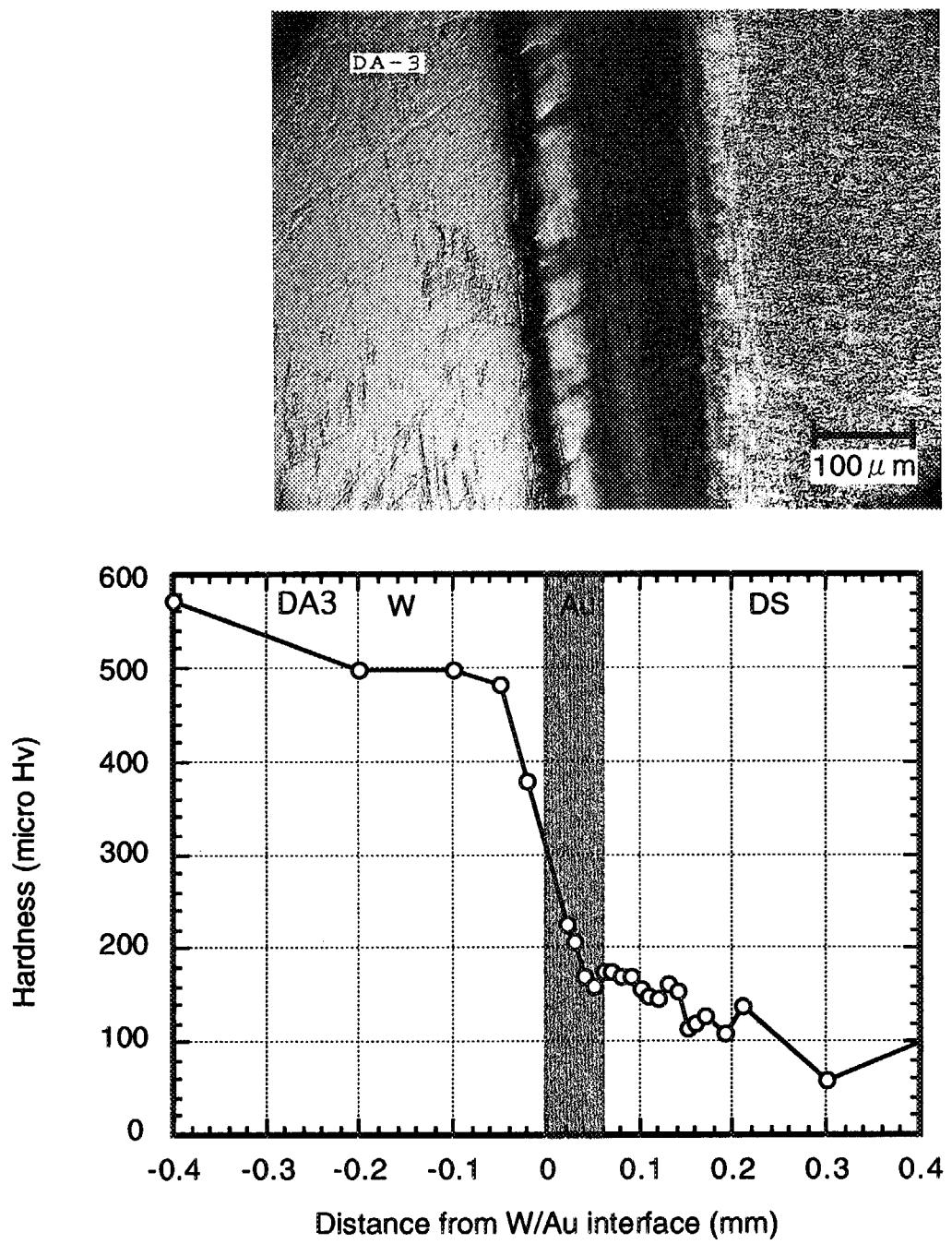


Fig. 3. 5 Hardness distribution around the interface between W and DS-Cu (880°C × 147MPa × 120min).

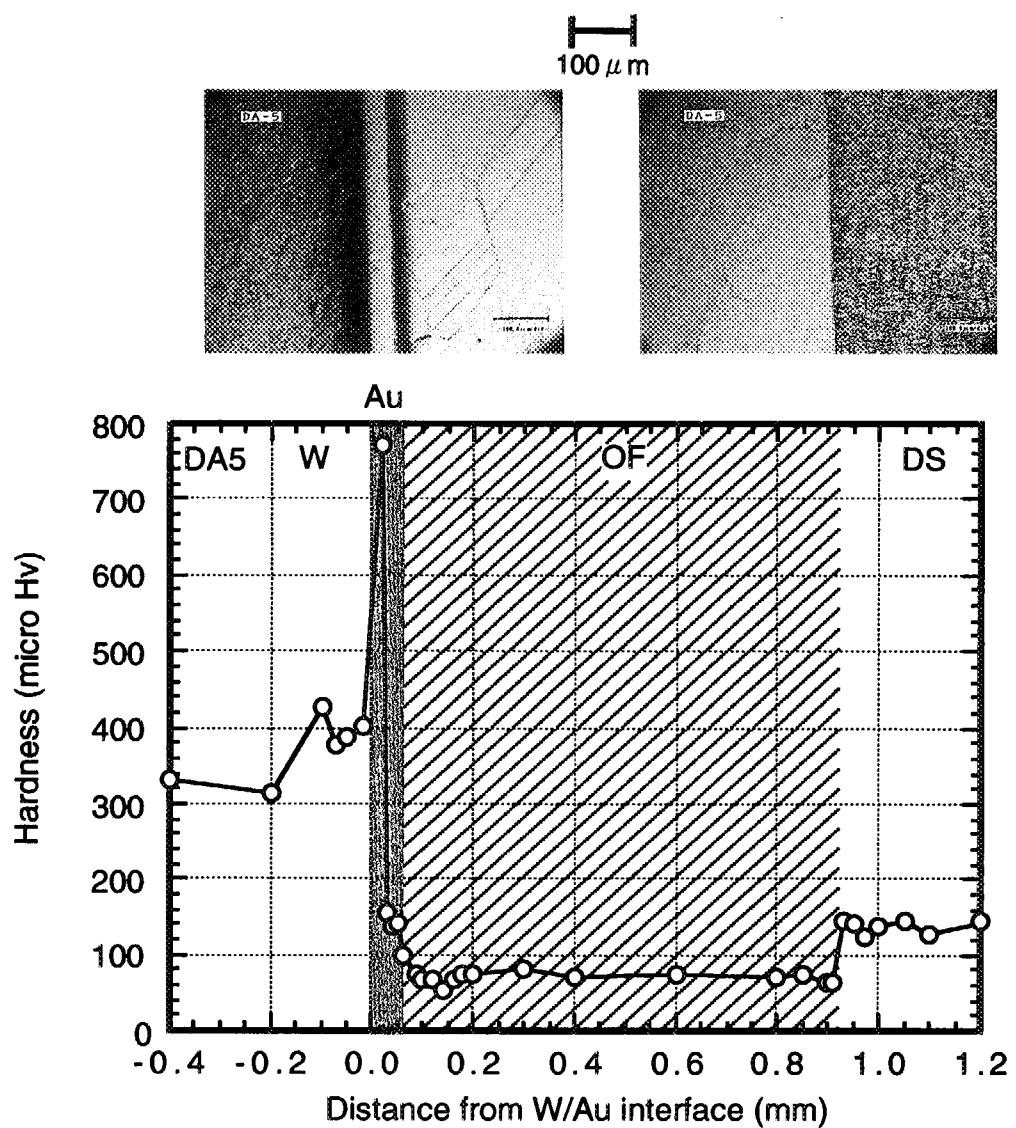


Fig. 3. 6 Hardness distribution around the interface between W and DS-Cu (850°C × 147MPa × 120min).

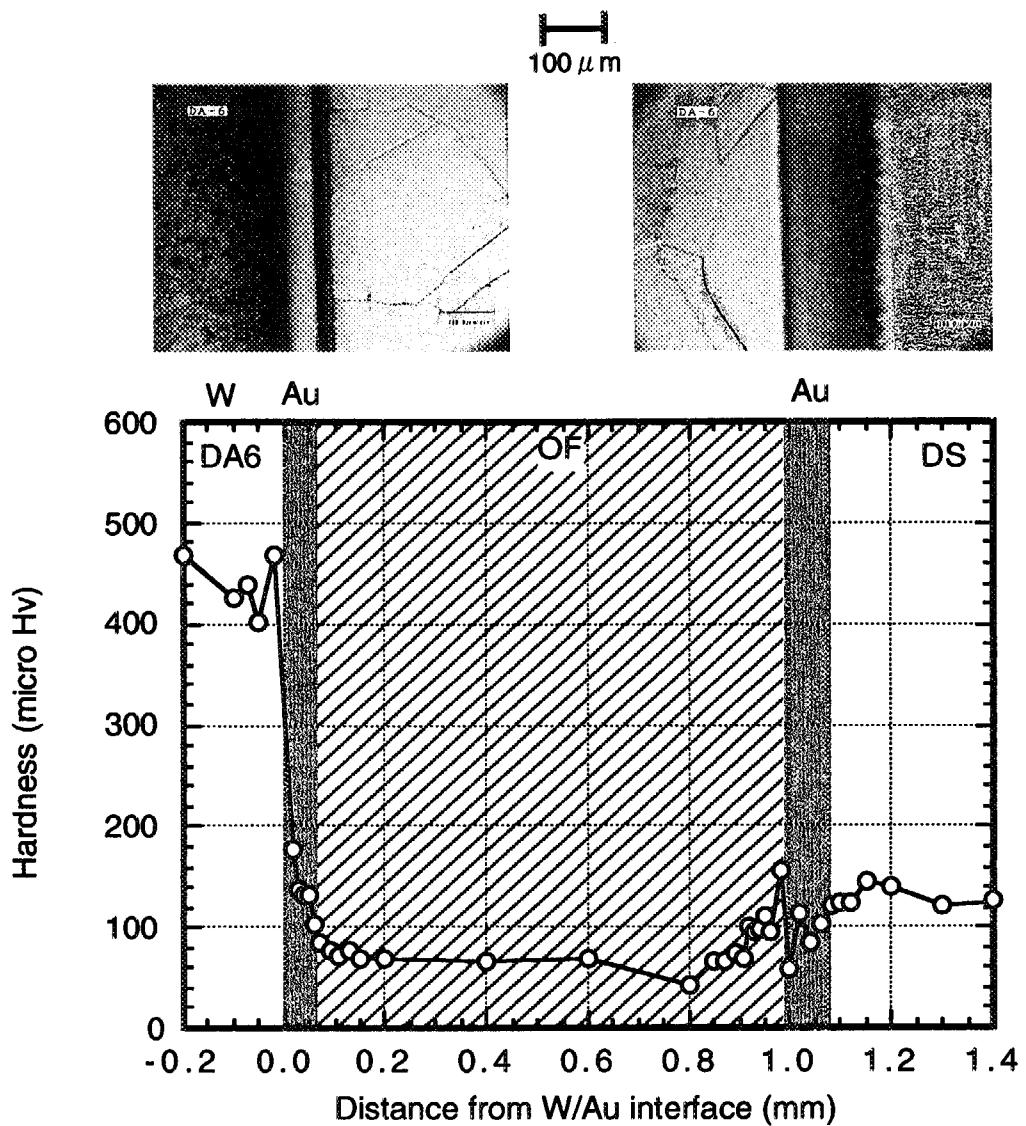


Fig. 3. 7 Hardness distribution around the interface between W and DS-Cu (850°C × 147MPa × 120min).

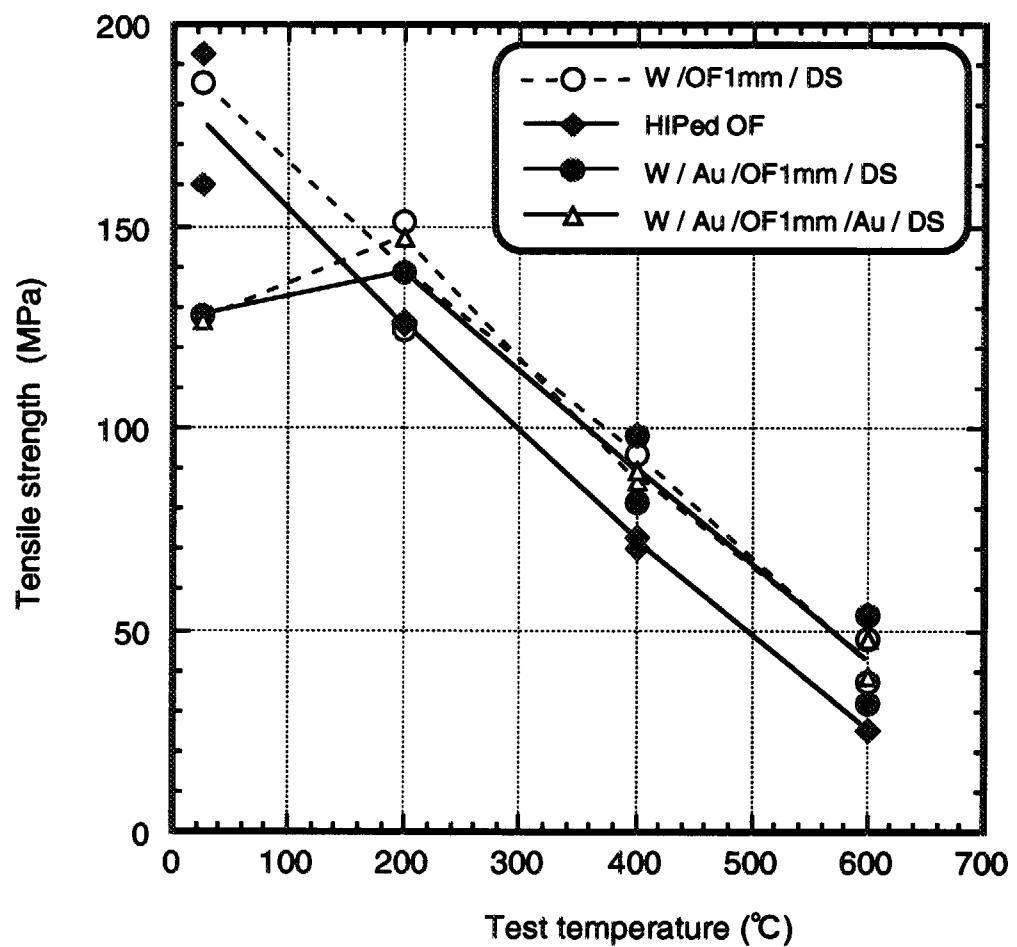


Fig. 3. 8 Temperature dependence of tensile strength on W/ Cu-alloy bonded specimens.

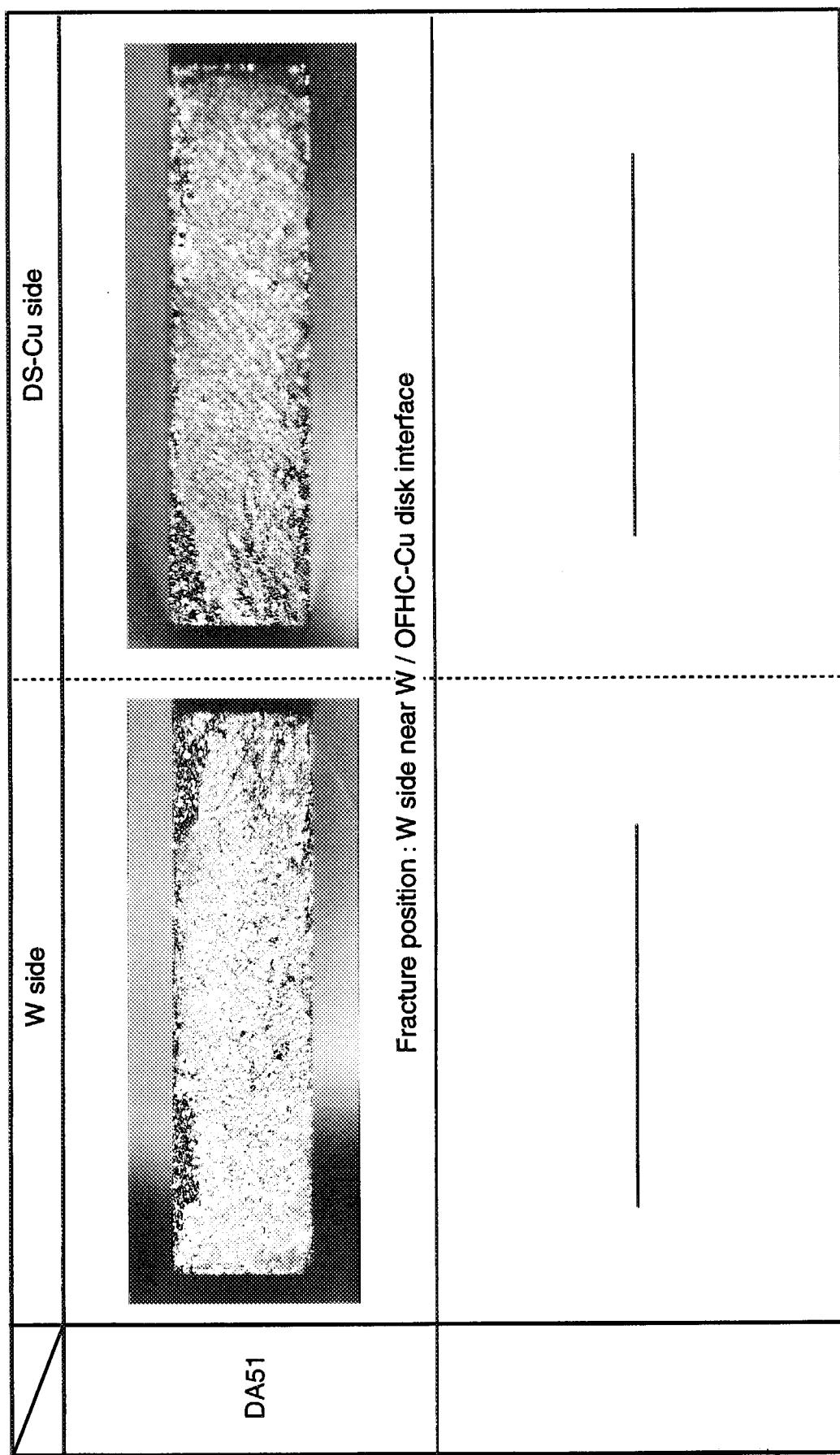


Fig. 3. 9(a) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : R.T.).

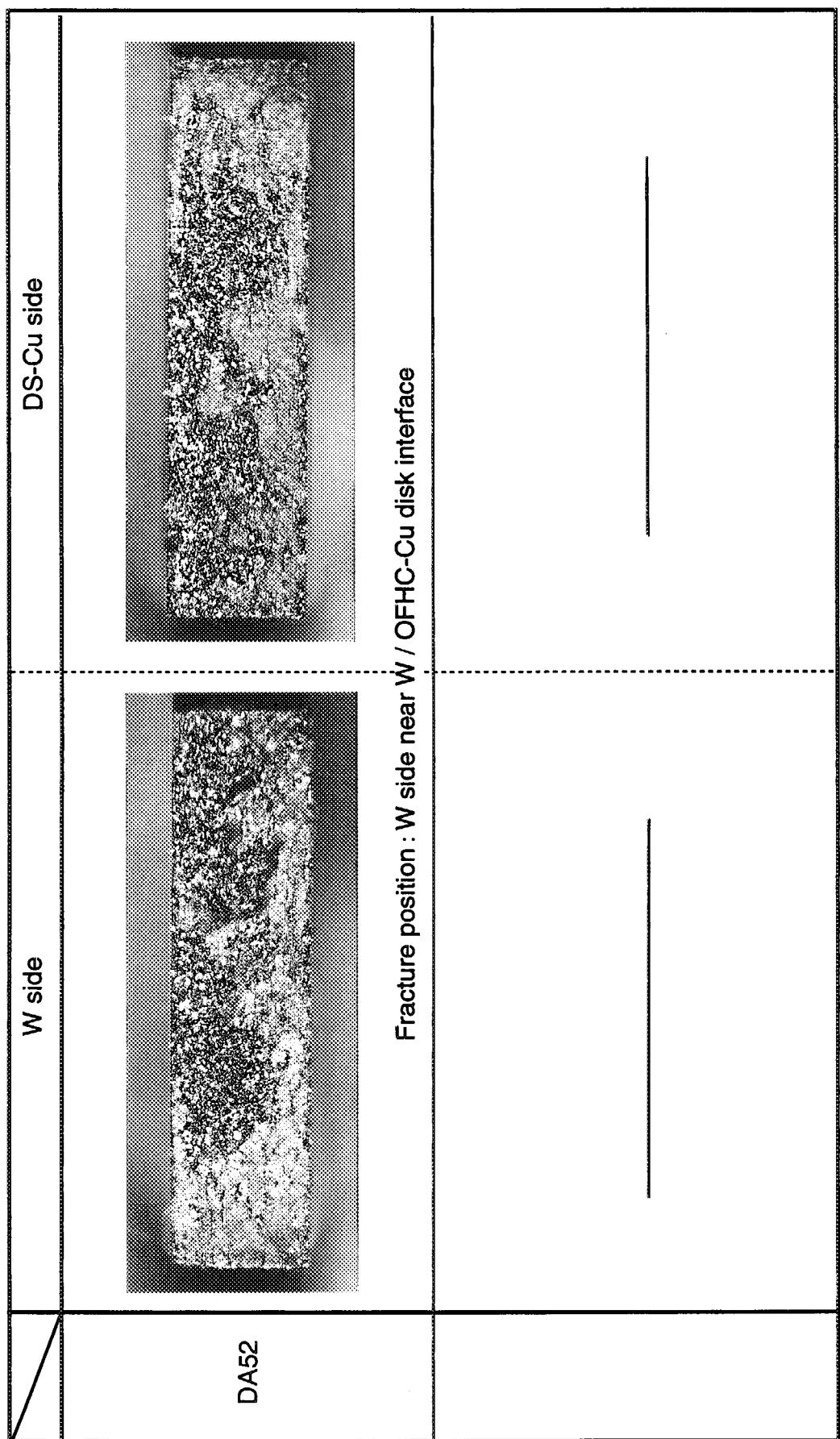


Fig. 3. 9(b) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : 200°C).

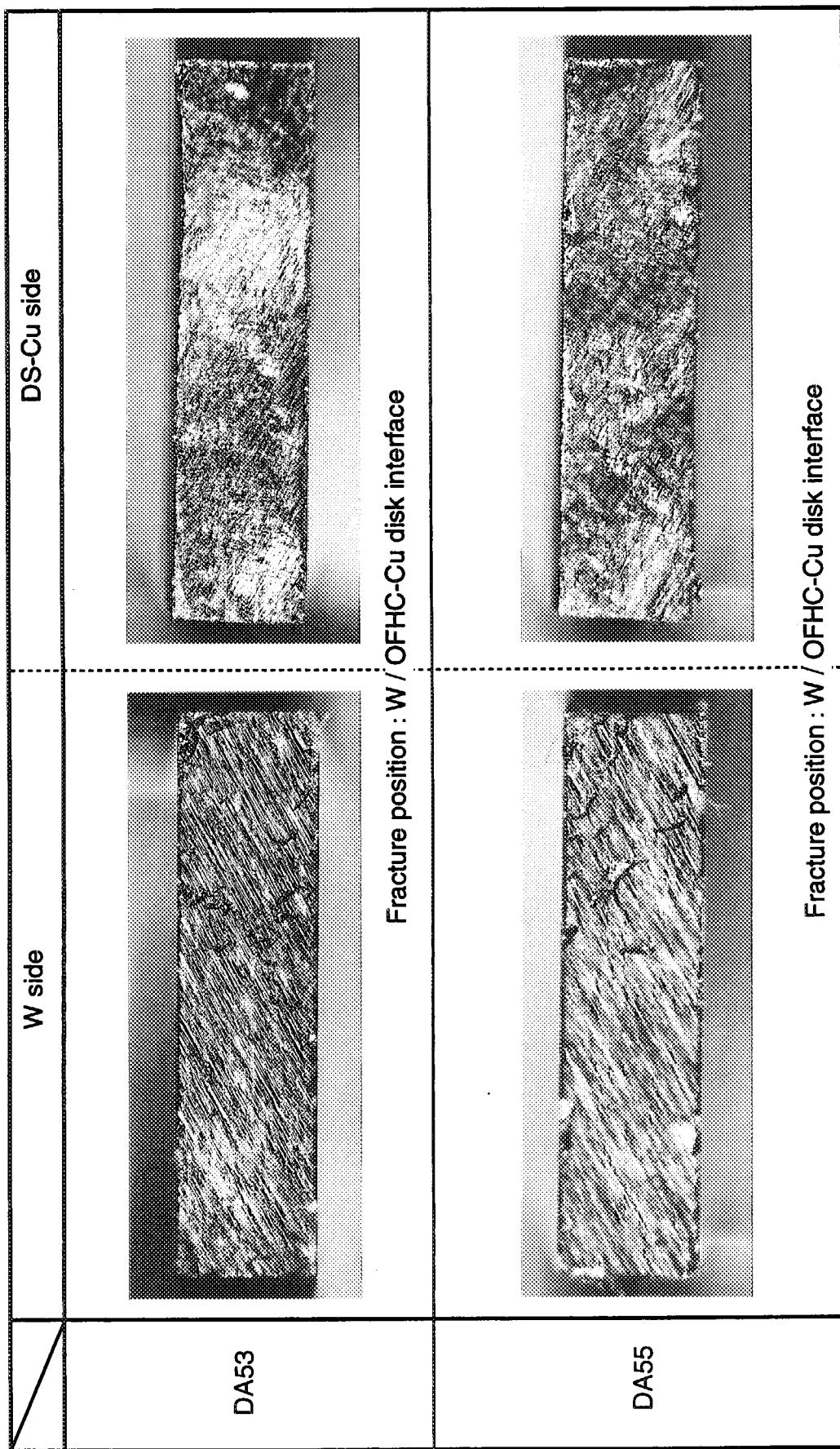


Fig. 3. 9(c) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : 400°C).

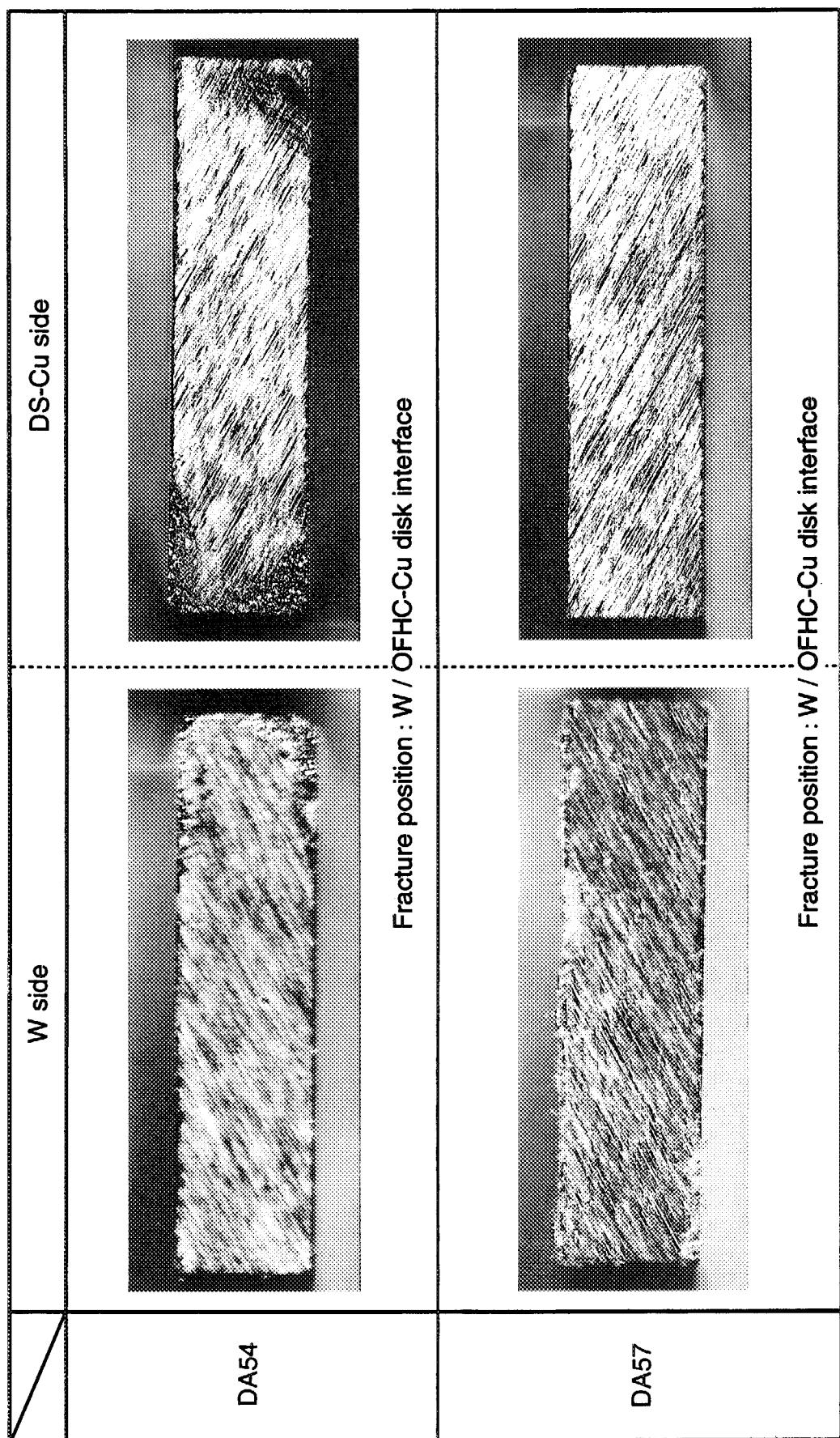


Fig. 3. 9(d) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : 600°C).

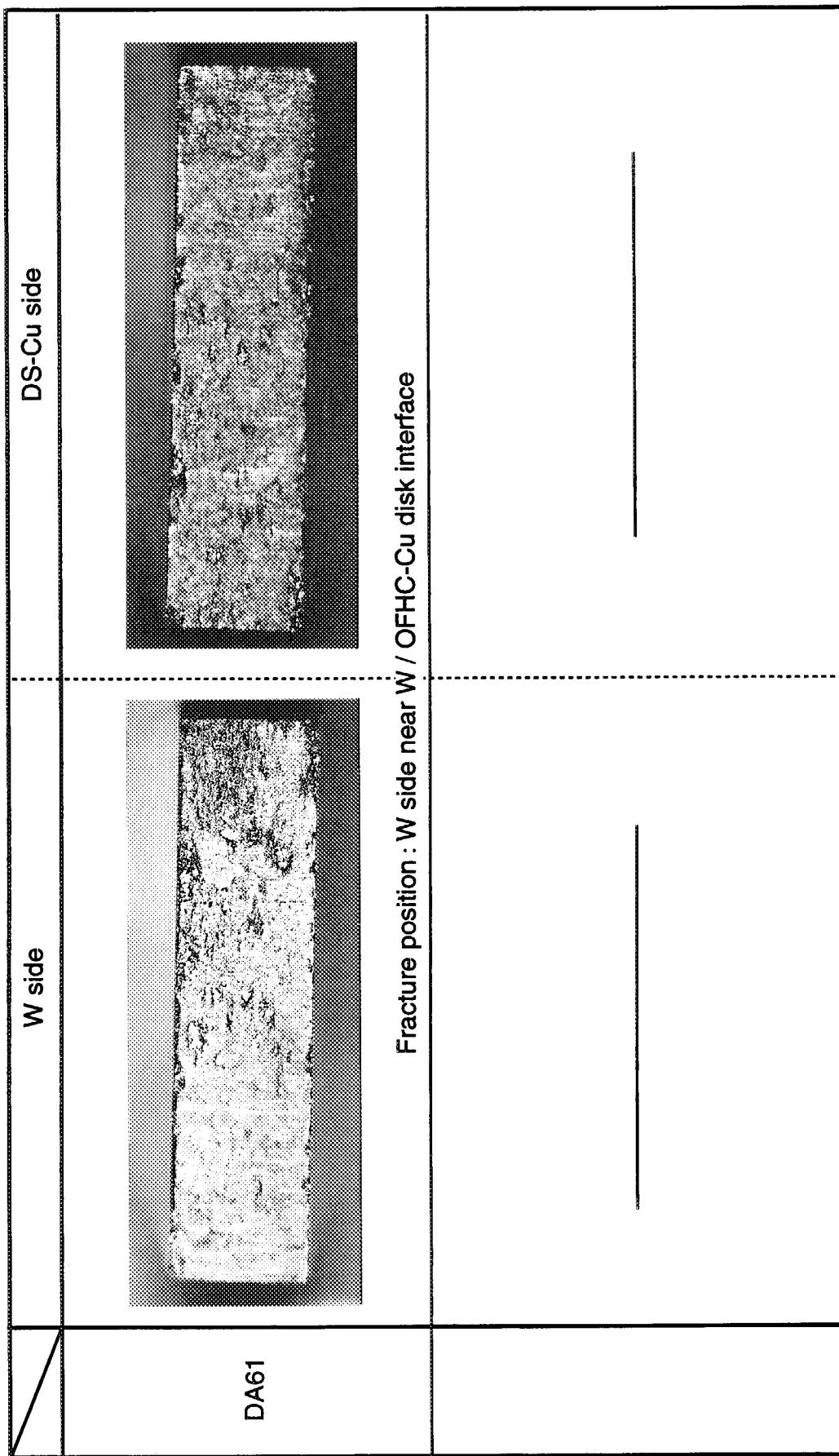


Fig. 3. 10(a) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : R.T.).

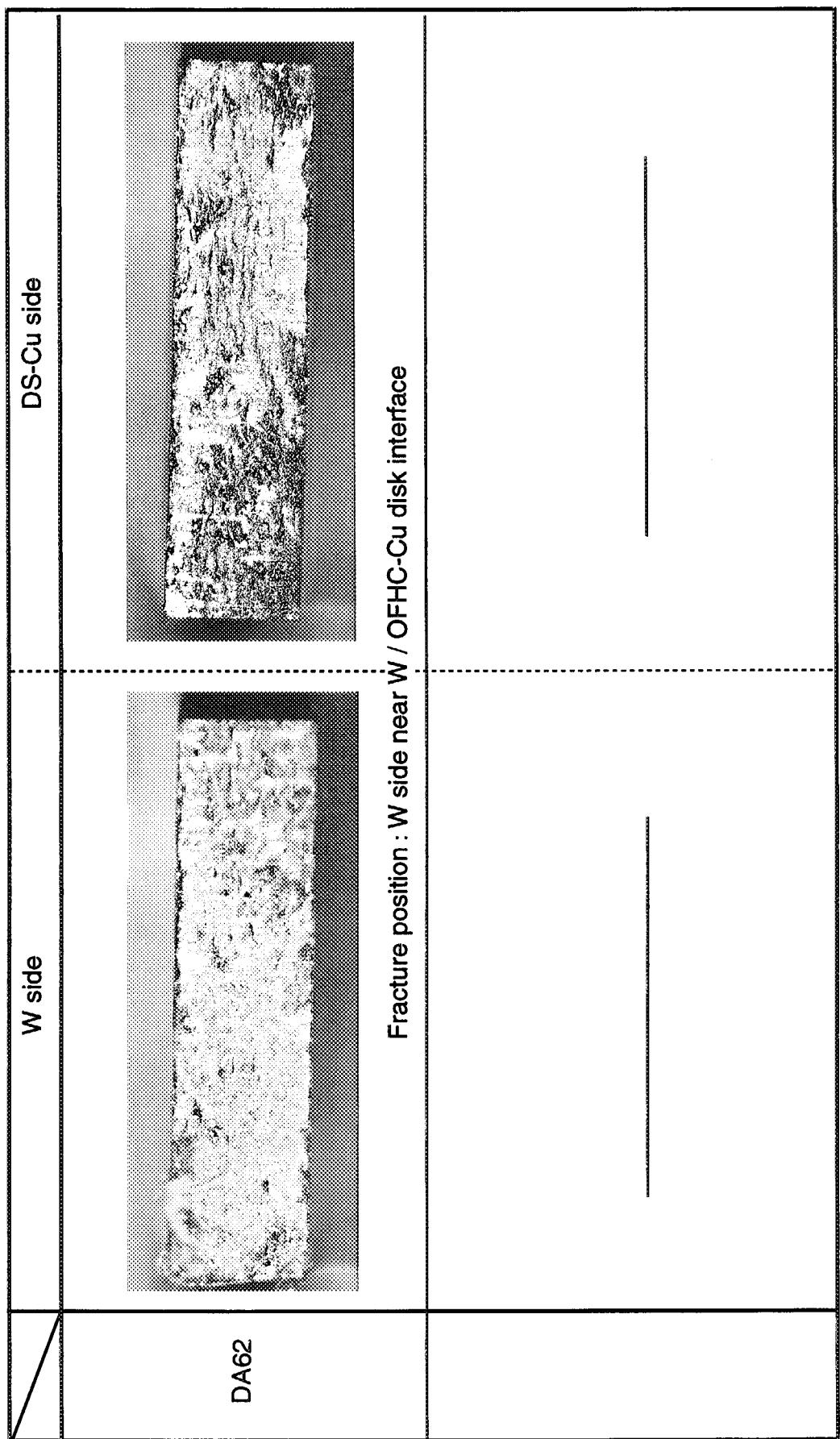


Fig. 3. 10(b) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : 200°C).

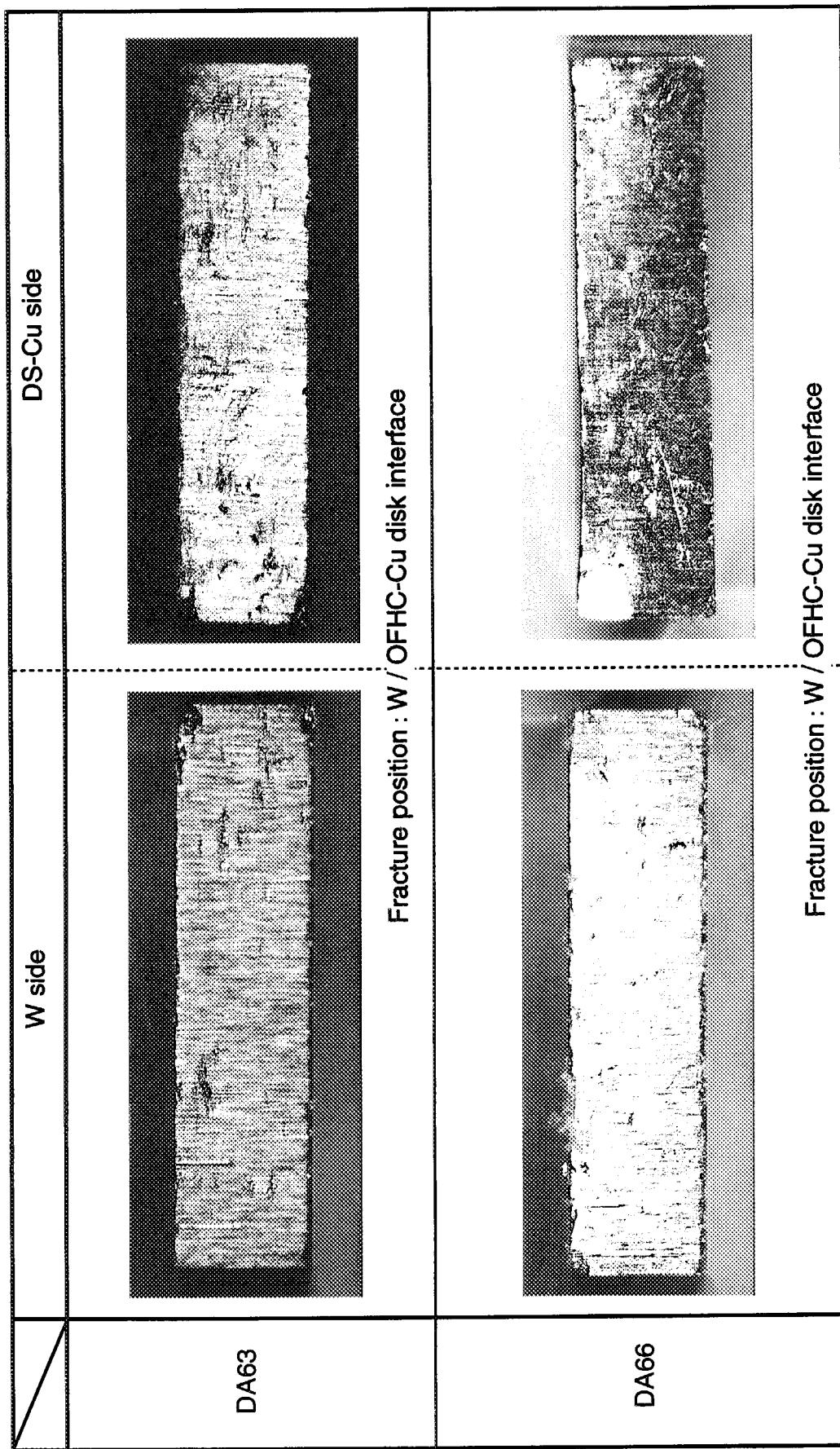


Fig. 3. 10(c) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : 400°C).

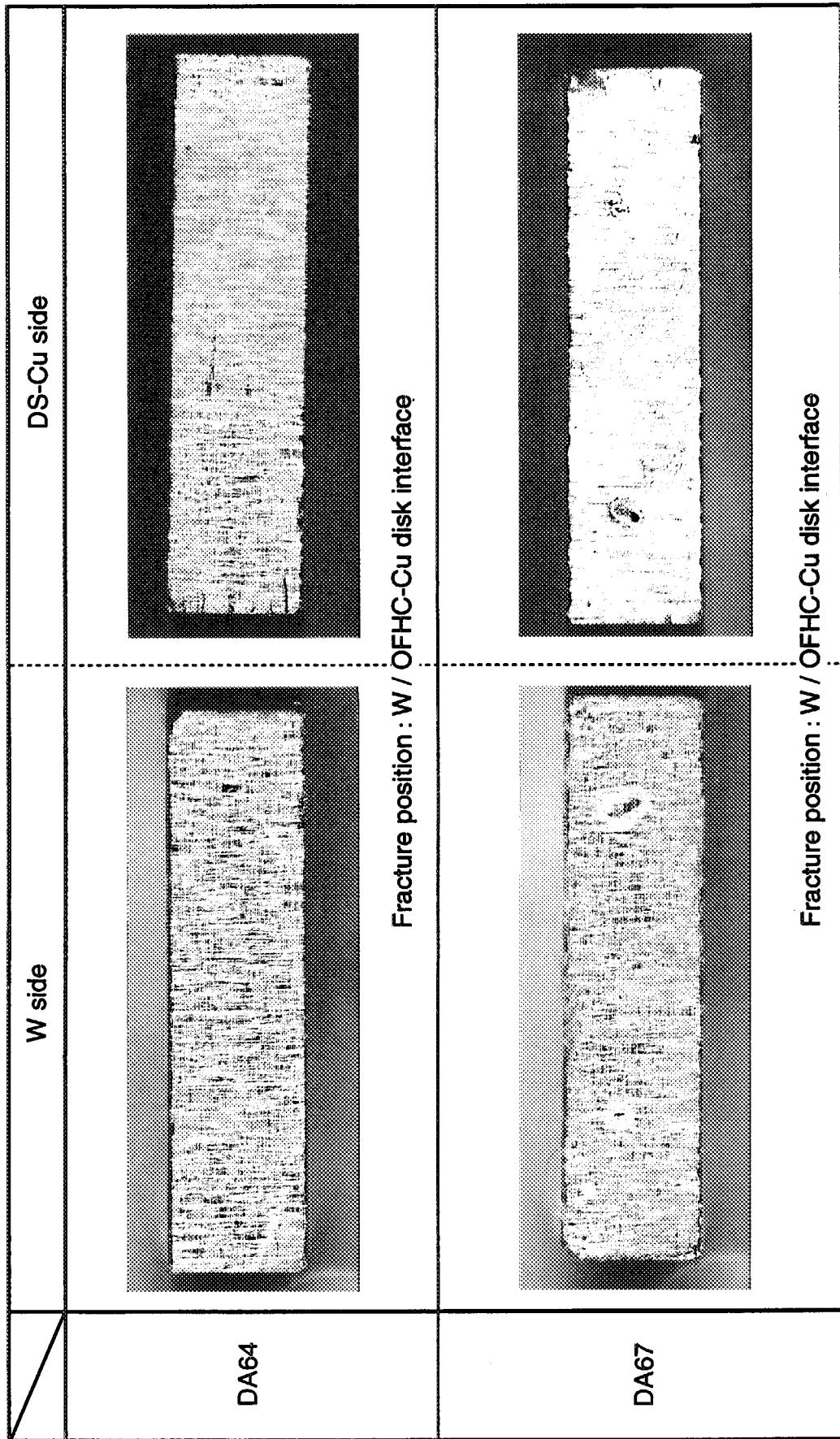


Fig. 3. 10(d) Macro photograph of fracture surface after tensile test (test temperature : 600°C).

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表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	ジーメンス	S	A/V
磁束	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	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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	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)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここで省略した。
- 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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

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

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

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	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 (仏馬力)	
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	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876	
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1	

(86年12月26日現在)

H-ヨードによるアクリルマ対向機器用W-CO₂合金接合技術の開発(3) 金箔を用いた接合

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。