



インパイル水ループ 2 号 (OWL-2) 用 SUS316 鋼の照射後試験

Post Irradiation Examination of Type 316 Stainless Steels
for In-pile Oarai Water Loop No.2 (OWL-2)

柴田 晃 木村 正 永田 寛 青山 征司
菅野 勝 近江 正男

Akira SHIBATA, Tadashi KIMURA, Hiroshi NAGATA, Masashi AOYAMA
Masaru KANNO and Masao OHMI

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

November 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

インパイル水ループ 2 号 (OWL-2) 用 SUS316 鋼の照射後試験

日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター 照射試験炉センター

柴田 晃、木村 正⁺、永田 寛⁺、青山 征司⁺、菅野 勝⁺、近江 正男

(2010 年 8 月 24 日受理)

インパイル水ループ 2 号 (OWL-2) は、主に軽水炉の燃料要素や構成材料の照射試験を行う目的で、昭和 47 年に JMTR に設置された水ループである。この OWL-2 では、炉内管材料として SUS316 鋼を使用した。高照射 SUS316 鋼の機械的特性のデータは OWL-2 が設置された当時から不足していた。これに対処するため、OWL-2 炉内管の材料である SUS316 鋼の試験片を炉内に装荷して、 $3.4 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ($> 1 \text{ MeV}$) までサーベランス試験は以前に行われている。しかしながら、SUS316 は JMTR に設置する他の照射装置の炉内管、照射キャプセル等に使用されており、より高い照射量における SUS316 の機械的特性のデータが求められている。そこで、本報告書では、OWL-2 炉内管で用いられた SUS316 について、 $1.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ まで照射した SUS316 鋼試験片を用いた照射後試験の結果について報告する。 $1.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ まで照射した SUS316 は、未照射及び $3.4 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ($> 1 \text{ MeV}$) まで照射した SUS316 と比較して、引張強度の増大及び破断伸びの減少が観察された。また、引張強度の変化傾向が速中性子照射量 $10^{24} \sim 10^{25} \text{n/m}^2$ での試験結果の延長上にあること、破断伸びが試験全域で 37% 以上残存していることを明らかにした。これにより、SUS316 は、高速中性子照射量 $1.0 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ まで炉内構造物として十分な延性を有しているとの結論を得た。

Post Irradiation Examination of Type 316 Stainless Steels for In-pile Oarai Water Loop No.2 (OWL-2)

Akira SHIBATA, Tadashi KIMURA⁺, Hiroshi NAGATA⁺,
Masashi AOYAMA⁺, Masaru KANNO⁺ and Masao OHMI

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 24, 2010)

The Oarai water loop No.2 (OWL-2) was installed in JMTR in 1972 for the purpose of irradiation experiments of fuel element and component material for light water reactors.

Type 316 stainless steels (SSs) were used for tube material of OWL-2 in the reactor. But data of mechanical properties of highly irradiated Type 316 SSs has been insufficient since OWL-2 was installed. Therefore surveillance tests of type 316 SSs which were irradiated up to $3.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ in fast neutron fluence ($>1 \text{ MeV}$) were performed.

Meanwhile type 316 stainless steel (SS) is widely used in JMTR such as other irradiation apparatus and irradiation capsule, and additional data of type 316 SSs irradiated higher is required.

Therefore post irradiation examinations of surveillance specimens made of type 316 SSs which were irradiated up to $1.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in fast neutron fluence were performed and reported in this paper.

In this result of surveillance tests of type 316 SSs irradiated up to $1.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$, tensile strength increase with increase of Neutron fluence and total elongation decreased with increase of Neutron fluence compared to unirradiated specimens and specimens irradiated up to $3.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$.

This tendency has good agreement with results of 10^{24} - 10^{25} n/m^2 in fast neutron fluence. More than 37% in total elongation was confirmed in all test conditions. It was confirmed that type 316 SS irradiated up to $1.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in fast neutron fluence has enough ductility as structure material.

Keywords : JMTR, OWL-2, In-pile Water Loop, Surveillance, Irradiated Material, SUS316

⁺ : Department of JMTR Operation

目 次

1. 序 論	1
2. 試験方法	1
2.1 試 料	1
2.2 照射条件	2
3. 照射後試験結果	2
4. 結 論	3
謝 辞	3
参考文献	3
付 録 衝撃試験後の破面観察写真	14

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
2.1 Specimens	1
2.2 Irradiation condition	2
3. Results of PIEs	2
4. Conclusions	3
Acknowledgement	3
References	3
Appendix Fractgraphy of impact test specimens	14

This is a blank page.

1. 序 論

インパイル水ループ 2 号 (OWL-2) ^[1] は、主に軽水炉の燃料要素や構成材料の照射試験を行う目的で、昭和 47 年に JMTR に設置された。この OWL-2 では炉内管として、SUS316 鋼が用いられており、速中性子照射量 (>1 MeV) に対する SUS316 鋼の使用限界を検討するために、サーベランス試験片を照射して、その特性評価が行われた^[2]。平成 4 年に所期の成果を得て OWL-2 炉内管が撤去され、OWL-2 はその役目を終えた。

一方、JMTR に設置されている照射装置の炉内管には、OWL-2 炉内管材料と同材質である SUS316 鋼が多く使用されている。SUS316 鋼に関する高照射域の機械的特性のデータは OWL-2 が設置された当時から不足しており、OWL-2 サーベランス試験で得られた速中性子照射量 (>1MeV) $3.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ 以上のデータは乏しい。このため、SUS316 鋼製炉内管の、高照射量領域での使用限界の検討資料とするために、高照射量データを整備することが必要不可欠である。

本報告書は、 $0.5 \sim 1.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ まで照射した OWL-2 炉内管のサーベランス試験片の照射後試験結果について記述している。照射後試験として、引張試験及び衝撃試験を行い、これらの試験後、走査型電子顕微鏡 (SEM) による破面観察を行った。

2. 試験方法

発電用原子炉圧力容器についてのサーベランス試験については、日本電気協会による「原子炉構造材の監視試験の方法」(JEAC 4201) やアメリカ AEC の原子力発電所設計基準、ASTME 185 に規定されている。オーステナイト系ステンレス鋼については、対象外であるが、これらの規格を参考として、SUS316 鋼の試験片を用いて照射後試験を行った。SUS316 鋼は、高速中性子の照射により損傷を受けるが、低温領域 (約 500℃以下) では強度が増加し、伸びが減少することが知られている^[3]。

照射後試験として、常温での引張試験及び衝撃試験を行った。また、これらの試験後それぞれの試験片の破面観察を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて行った。

サーベランス試験片に供した試料は、JMTR 炉心燃料領域で、昭和 52~61 年 (JMTR 運転サイクル: 42~75 サイクル) の間で照射され、照射済サーベランス試験片の線量が高いため、約 7 年間冷却したものである。

なお、照射後試験は、JMTR ホットラボで下記の試験機を使用して実施した。

引張試験機：ミネベア(株)製、最大能力 5 t

TCM-5000、引張速度 2.0 mm/min

衝撃試験機：東京試験機(株)製、最大能力 30 kg・m

2.1 試 料

サーベランス試験片に供した試料は、SUS32TP (SUS316TP) である。ミルシートを Table 1 に示す。本試料は、配管用ステンレス鋼鋼管 (JIS G3459) であり、JMTR で用いる引張試験片形状及び衝撃試験 (シャルピー試験) 片形状に加工したものである。試料の種類および個数を Table 2 に示す。なお、非照射材の試料は、サーベランス試験片を採取した同一材料から、照射用試料採取時と同時に採取した試料とした。サーベランス試験片 (引張試験片及び衝撃試験片) の形状及び寸法を Fig. 1 に示す。

2.2 照射条件

サーベランス試験片はアルミニウム製ホルダで固定し、JMTRにおける標準型の無計測リーキーキャプセル(4孔用ステンレス製バスケット:照射試料が原子炉一次冷却水で冷却される構造)2体にサーベランス試験片を組込み、照射試験を行った。無計測リーキーキャプセルをFig. 2に、無計測リーキーキャプセル内のサーベランス試験片の配置をFig. 3に示す。

サーベランス試験片は、軸方向に余弦分布した中性子照射を受けるため、各試料は装荷位置によって異なった照射量になる。これらの関係をFig. 4に示す。

高速中性子照射量 (>1 MeV) をパラメータとして照射データを取得するために、Table 3に示す照射条件で行った。これにより照射量 $0.5\sim 1.0\times 10^{26}\text{n/m}^2$ (>1MeV) の引張試験片 10 本、照射量 $5.3\sim 6.2\times 10^{25}\text{n/m}^2$ (>1MeV) のシャルピー試験片 6 本を得られた。

サーベランス試験片の照射温度に関しては、試料に組込まれた無計測リーキーキャプセルの γ 線発熱量も小さく、試料が原子炉一次冷却水に直接触れ十分に除熱されることから、原子炉一次冷却水温度と同一の $40\sim 50^\circ\text{C}$ であると予想される。

3. 照射後試験結果

サーベランス試験片 (SUS316) の引張試験結果を Table 4 及び 5 に、衝撃試験結果を Table 6 及び 7 に示す。高速中性子照射量 (>1MeV) に対する引張強さ、降伏強さ、破断強さ及び破断伸びとの関係を Fig. 5、6、7 及び 8 に、高速中性子照射量 (>1MeV) に対する衝撃吸収エネルギーの関係を Fig. 9 に示す。なお、付録に、サーベランス試験片の衝撃試験後における外観破面写真を Photo 1 に、サーベランス試験片の衝撃試験後の破面 SEM 観察結果を Photo 2~9 に示す。

Table 4~5 及び Fig. 5~8 の結果から、SUS316 の引張強さ、降伏強さ及び破断強さについて、照射前と比較して増加しているが、高速中性子照射量 $10^{24}\sim 10^{26}\text{n/m}^2$ の範囲では僅かな増加であることが分かった。一方、SUS316 の破断伸びについて、照射前と比較して減少しているが、高速中性子照射量 $1.0\times 10^{24}\sim 1.0\times 10^{26}\text{n/m}^2$ の範囲では僅かな減少であり、延性材料として十分な破断伸びが残存していることが分かった。

Table 6~7 及び Fig. 9 から、SUS316 の衝撃吸収エネルギーについて、照射前と比較して減少しているが、高速中性子照射量 $10^{24}\sim 10^{26}\text{n/m}^2$ の範囲では僅かな減少であり、靱性がほとんど低下していないことが分かった。衝撃試験後の破面観察の結果、本照射量の範囲では照射脆化の現象は見られないことが観察された。

最大高速中性子照射量 (>1MeV) $1.0\times 10^{26}\text{n/m}^2$ まで照射したサーベランス試験片を用いた照射後試験結果から、SUS316 の引張強さは 731MPa、降伏強さは 723MPa、破断強さは 510MPa、破断伸びは 37%の特性を有していることが明らかとなった。高速中性子照射量 (>1MeV) に対する延性を Fig. 10 に示す。Fig. 10 は、本試験と他文献の比較も示している [2, 4-10]。一般に延性の評価として、標準試験による引張試験による破断伸び ϵ が 1%以下の材料を脆性、1~10%の材料を亜延性、10%以上の材料を延性と分類されている [11]。これにより、SUS316 は高速中性子照射量 $1.0\times 10^{26}\text{n/m}^2$ でも炉内構造材として十分な延性を有しているものと考えられる。

4. 結 論

最大高速中性子照射量 ($>1\text{MeV}$) $1.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ まで照射したサーベランス試験片を用いた照射後試験結果から、未照射及び $3.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($> 1 \text{ MeV}$) まで照射した SUS316 と比較して、引張強度の増大及び破断伸びの減少が観察された。また、引張強度の変化傾向が速中性子照射量 $10^{24} \sim 10^{25} \text{ n/m}^2$ での試験結果の延長上にあること、破断伸びが試験全域で 37% 以上残存していることを明らかにした。これにより、SUS316 は、高速中性子照射量 $1.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ まで炉内構造物として十分な延性を有しているとの結論を得た。

JMTR は、中性子束密度が高速中性子、熱中性子とも最高 $4 \times 10^{18} \text{ n/m}^2/\text{s}$ と世界でも最高レベルの汎用照射試験炉であり、炉心に設置するステンレス鋼製配管、照射キャプセル等は一定期間の後更新をせざるを得ない。本試験結果より更新寿命を大幅に拡張できると期待される。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、大洗研究開発センター 河村 弘副所長（照射試験炉センター長）及び照射試験炉センター 石原正博副センター長、原子炉施設管理部 新見素二部長及び楠剛次長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書をまとめる上で照射試験開発課 土谷邦彦課長及び安全研究センター 埴悟史研究副主幹のご助言を頂きました。さらに、照射設備整備課及びホットラボ管理課諸氏には多大なご協力を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

参考文献

- [1] H. Nakata et al., "Irradiation facilities in JMTR", JAERI-M 82-119 (1982)
- [2] 清水正亜 他, "OWL-2 炉内管のサーベランステスト", JAERI-M 6667 (1976)
- [3] 日本材料学会編, "照射効果と材料", (1994)
- [4] A. Shibata, J. Nakano et al., "TECHNICAL DEVELOPMENT FOR IASCC IRRADIATION EXPERIMENTS AT THE JMTR", Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE 16-48588 (2008)
- [5] M. Kangilaski, F. R. Shober, J.A. Demastry and J. E. Gates, BMI-1834
- [6] J.W. Joseph, Jr., Mechanical Properties of Irradiated Welds in Stainless Steel DP-534 (1960)
- [7] Graber, M. J. and Ronsick, J. H., IDO-16628, "ETR Radiation Damage Surveillance Programs, Progress Report 1,"(1961)
- [8] D.L.Keller, BMI-1862 (1969).
- [9] R.W.Dayton and R.F. Dickerson, BMI-1581 (1962)
- [10] R.W. Dayton and R. F. Dickerson, BMI-1694 (1964)
- [11] Papirno.R., Ductility in Structural Design, "Ductility", American Society for Metals, (1968)

Table 1 Mill certification of OWL-2 in-pile tube material

Article		: Seamless Stainless Steel Pipe (Cold drawn)													
Specification		: JIS G3459-32 (SUS 32TP [SUS316TP])													
Size		: (124.7) 117.8 mm ϕ^{OD} \times 4.8 mmt													
Hydrostatic test 140 kg/cm ² good	Surface & Dimensions good	Description of Tests		Remarks			Liquid Penetrant Examinatio : good								
		Flattening Good		Ultrasonic Test : good			Straightness (1/1500) : good								
Tensile Properties		Chemical Compositions													
std. min. max.	Yield Point [MPa]	206	Tensile Strength [MPa]	510	Elongation [%] in 50mm	304	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
			0.08				1.00	2.00	0.040	0.030	10.00	16.00	2.00	10.00	16.00
	275	265	559	579	579	588	0.05	0.63	1.80	0.024	0.007	13.30	17.00	2.16	0.29 Check
			579	588	0.05	0.64	1.77	0.024	0.006	13.40	17.00	2.15	0.29 Ladle		

Table 2 Number and type of specimens

Type of specimens		Number
Tensile specimen	Irradiated	10
	Un-irradiated	4
Charpy specimen	Irradiated	6

Table 3 Irradiation condition

Capsule ID	Irradition hole	Operation cycle	Irradiation period	Total irradiation period	Maximum neutron fluence (>1 MeV)
76M-12J	J-9-2	No. 42cy.	1 cy.	17 cy (*1,*2)	6.2x10 ²⁵ n/m ²
	J-7-2	No. 47~63cy.	16 cy.		
76M-13J	J-9-4	No. 47~75cy.	28 cy.	28 cy. (*2)	1.0x10 ²⁶ n/m ²

*1 : No. 43~46 cy. : The capsule was loaded out of core center area

*2 : Operation of No. 62 cy. was stopped a few hours later from the start of operation.

Table 4 Mechanical properties of unirradiated specimens

	Specimen ID	Neutron Fluence [n/m ²] (E > 1 MeV)	Test Temperature [°C]	Yield Stress [MPa]	Fracture strength [MPa]	Ultimate tensile strength [MPa]	Total Elongation [%]
Surveillance Tests of OWL-2 [2]	141	-	20	-	-	581	62.8
	142	-	20	-	-	583	62.3
	143	-	20	-	-	586	65.2
	144	-	20	-	-	583	65.3
	145	-	12	313	379	590	64.5
	146	-	12	342	371	597	62.0
	149	-	12	304	354	586	66.0
Additional Surveillance Tests of OWL-2	103	-	20	287	353	546	65.8
	104	-	20	263	357	545	67.0
	93	-	20	257	345	536	65.3
	94	-	20	256	345	535	67.3

Strain rate : 2.00mm/min, G.L. =40mm

Table 5 Mechanical properties of irradiated specimens

	Specimen ID	Neutron Fluence [n/m ²] (E > 1 MeV)	Test Temperature [°C]	Yield Stress [MPa]	Fracture strength [MPa]	Ultimate tensile strength [MPa]	Total Elongation [%]
Surveillance Tests of OWL-2 [2]	141	0.03 x 10 ²⁶	12	645	457	724	41.2
	142	0.06 x 10 ²⁶	12	625	472	727	40.4
	146	0.08 x 10 ²⁶	12	686	476	738	40.5
	148	0.08 x 10 ²⁶	12	679	482	741	39.8
	151	0.09 x 10 ²⁶	12	674	478	735	40.4
	143	0.10 x 10 ²⁶	12	680	480	731	40.2
	145	0.11 x 10 ²⁶	12	675	468	736	40.9
	147	0.11 x 10 ²⁶	12	681	490	743	40.1
	144	0.12 x 10 ²⁶	12	678	461	743	42.1
	152	0.17 x 10 ²⁶	12	684	488	736	40.4
	150	0.22 x 10 ²⁶	12	694	500	739	40.2
	156	0.22 x 10 ²⁶	12	700	484	743	37.9
	153	0.28 x 10 ²⁶	12	712	485	746	40.2
	149	0.31 x 10 ²⁶	12	720	510	751	39.6
	155	0.31 x 10 ²⁶	12	709	483	743	39.3
154	0.34 x 10 ²⁶	12	698	486	739	38.6	
Additional surveillance Tests of OWL-2	TS65	0.53 x 10 ²⁶	20	674	484	715	38.3
	TS66	0.53 x 10 ²⁶	20	680	485	717	38.8
	TS69	0.55 x 10 ²⁶	20	692	490	723	36.8
	TS70	0.55 x 10 ²⁶	20	685	482	719	37.0
	TS71	0.55 x 10 ²⁶	20	696	490	725	39.8
	TS68	0.62 x 10 ²⁶	20	693	481	727	39.3
	TS81	0.88 x 10 ²⁶	20	725	495	735	38.8
	TS82	0.88 x 10 ²⁶	20	715	483	733	37.0
	TS83	0.88 x 10 ²⁶	20	698	504	734	35.3
	TS80	1.00 x 10 ²⁶	20	723	510	731	37.3

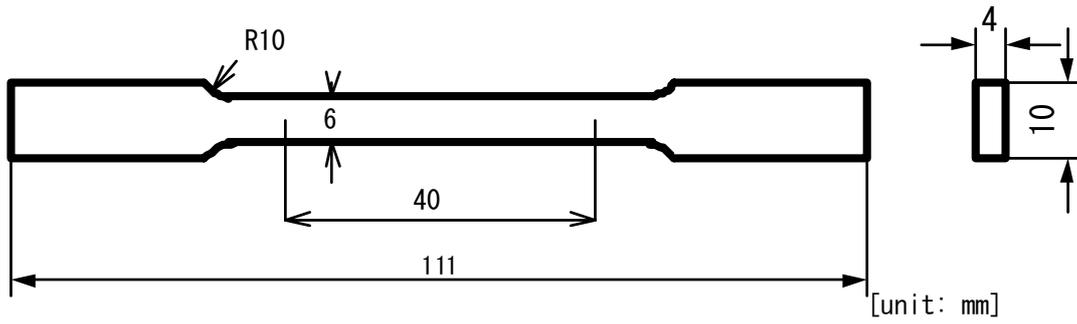
Strain rate : 2.00mm/min, G.L. =40mm

Table 6 Charpy impact value of unirradiated specimens

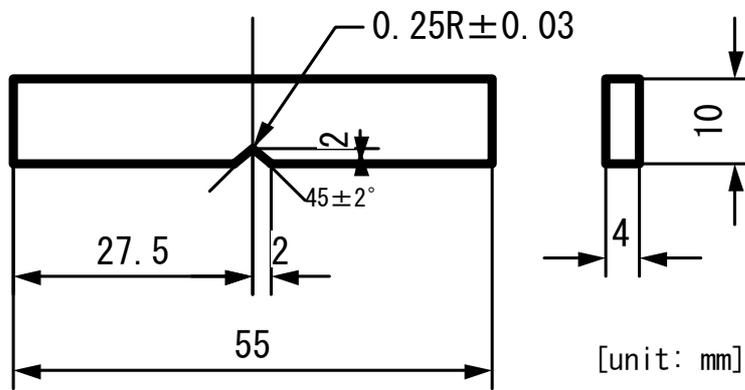
Specimen ID	Test Temperature (°C)	Neutron Fluence (n/m ² , E > 1 MeV)	Charpy impact value (J/mm ²)
9	19	-	2.02
10	19	-	2.02
11	19	-	2.15
12	19	-	2.12
17	19	-	2.24
18	19	-	2.08
19	19	-	2.12
20	19	-	2.27

Table 7 Charpy impact value of irradiated specimens

	Specimen ID	Test Temperature [°C]	Neutron Fluence [n/m ²] (E > 1 MeV)	Charpy impact value (J/mm ²)
Surveillance Tests of OWL-2 [2]	1	19	0.10 x 10 ²⁵	1.28
	2	19	0.38 x 10 ²⁵	1.41
	3	19	0.52 x 10 ²⁵	1.26
	13	19	0.62 x 10 ²⁵	1.41
	4	19	0.67 x 10 ²⁵	1.35
	12	19	0.69 x 10 ²⁵	1.31
	11	19	0.87 x 10 ²⁵	1.44
	5	19	0.93 x 10 ²⁵	1.41
	10	19	1.02 x 10 ²⁵	1.31
	6	19	1.05 x 10 ²⁵	1.35
	14	19	1.05 x 10 ²⁵	1.28
	9	19	1.13 x 10 ²⁵	1.28
	7	19	1.14 x 10 ²⁵	1.35
	8	19	1.20 x 10 ²⁵	1.41
	15	19	1.45 x 10 ²⁵	1.31
	16	19	1.90 x 10 ²⁵	1.28
	24	19	1.95 x 10 ²⁵	1.38
	23	19	2.40 x 10 ²⁵	1.26
	17	19	2.65 x 10 ²⁵	1.41
	22	19	2.85 x 10 ²⁵	1.23
Additional Surveillance Tests of OWL-2	18	19	3.00 x 10 ²⁵	1.44
	21	19	3.20 x 10 ²⁵	1.23
	19	19	3.28 x 10 ²⁵	1.41
	20	19	3.40 x 10 ²⁵	1.26
	CH5	25	5.33 x 10 ²⁵	1.23
	CH6	25	5.33 x 10 ²⁵	1.23
CH9	25	5.46 x 10 ²⁵	1.28	
CH10	25	5.46 x 10 ²⁵	1.31	
CH7	25	6.21 x 10 ²⁵	1.23	
CH8	25	6.21 x 10 ²⁵	1.28	



(a) Specimen for tensile test



(b) Specimen for charpy impact test

Fig. 1 Specimens for surveillance test

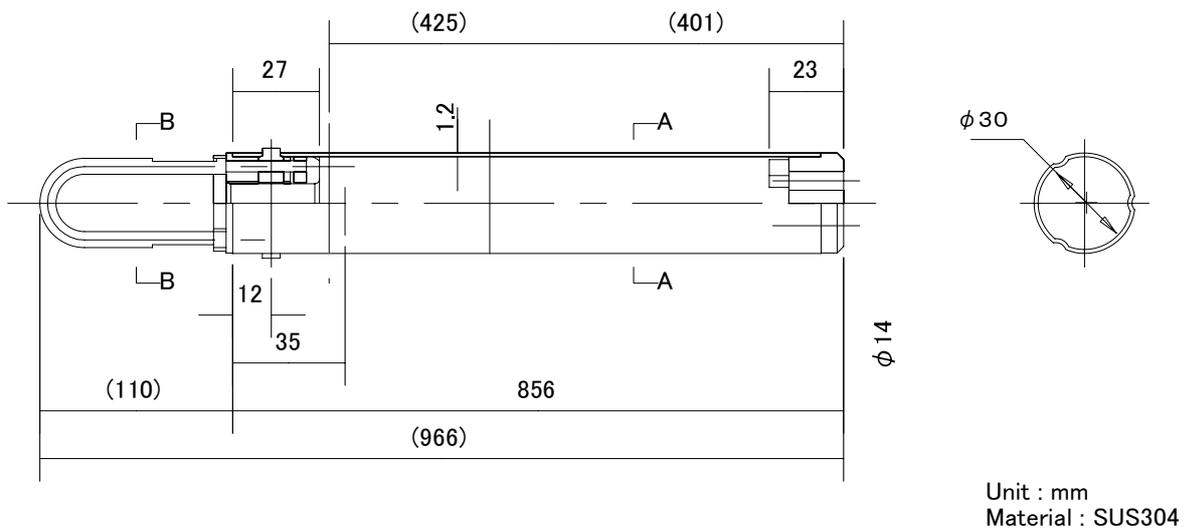


Fig.2 Leaky type capsule for irradiation tests at 4 holes reflector section in JMTR

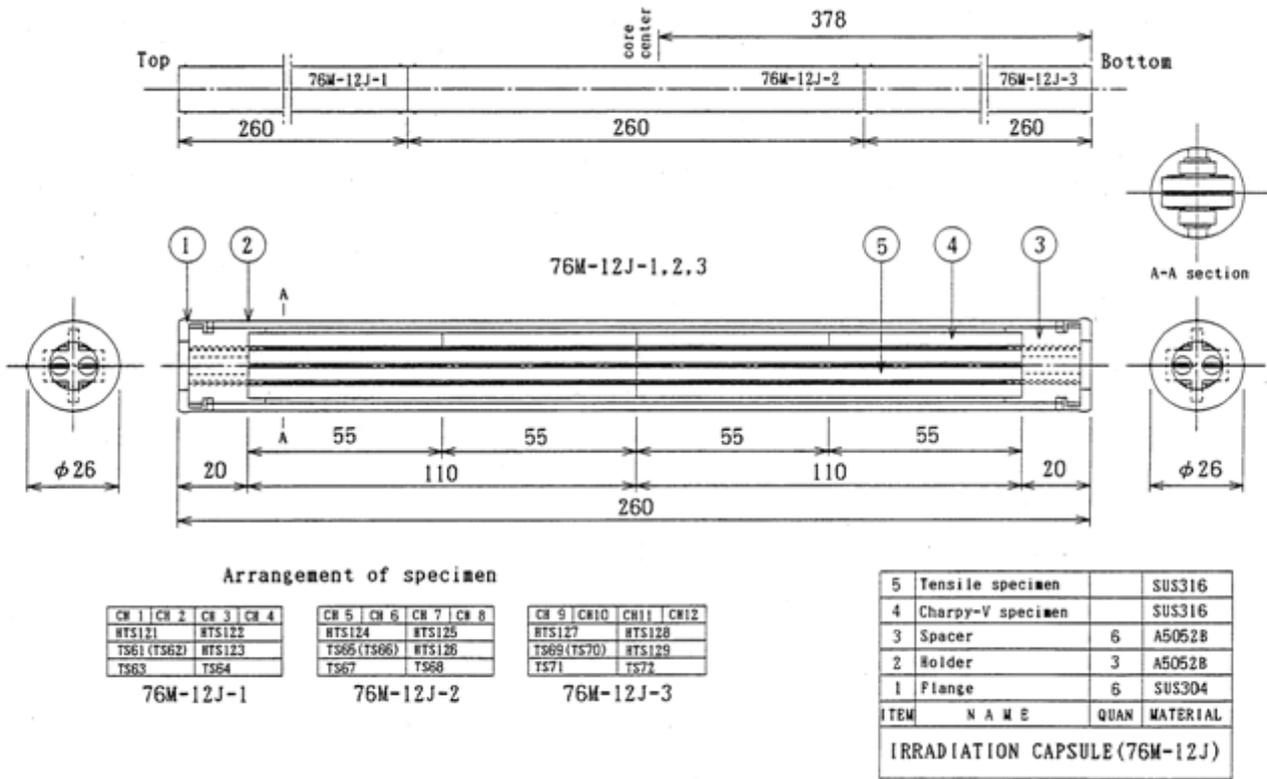


Fig. 3 Geometry of irradiation capsule (76M-12J)

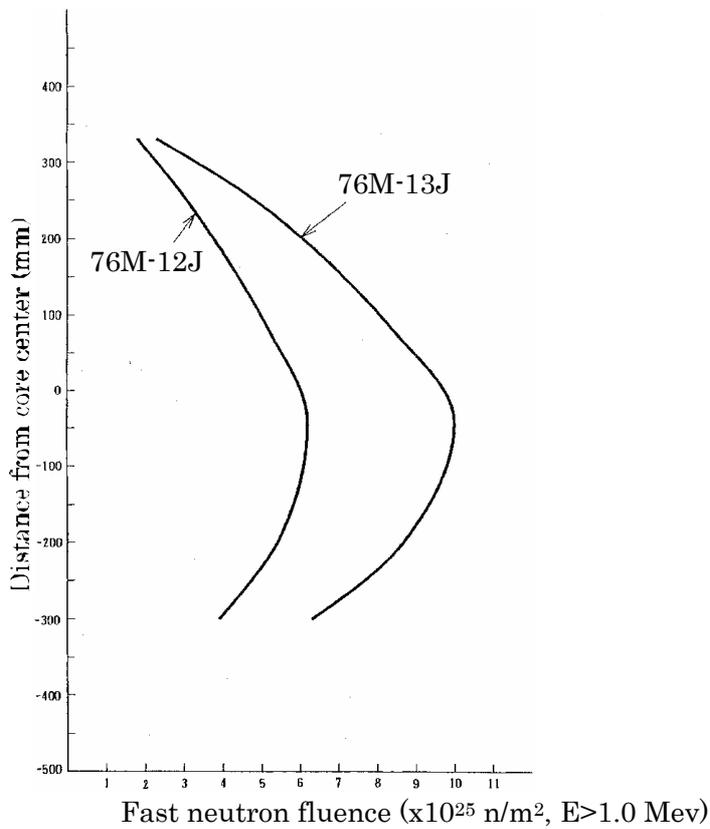


Fig. 4 Relationship with irradiation position and fast neutron fluence

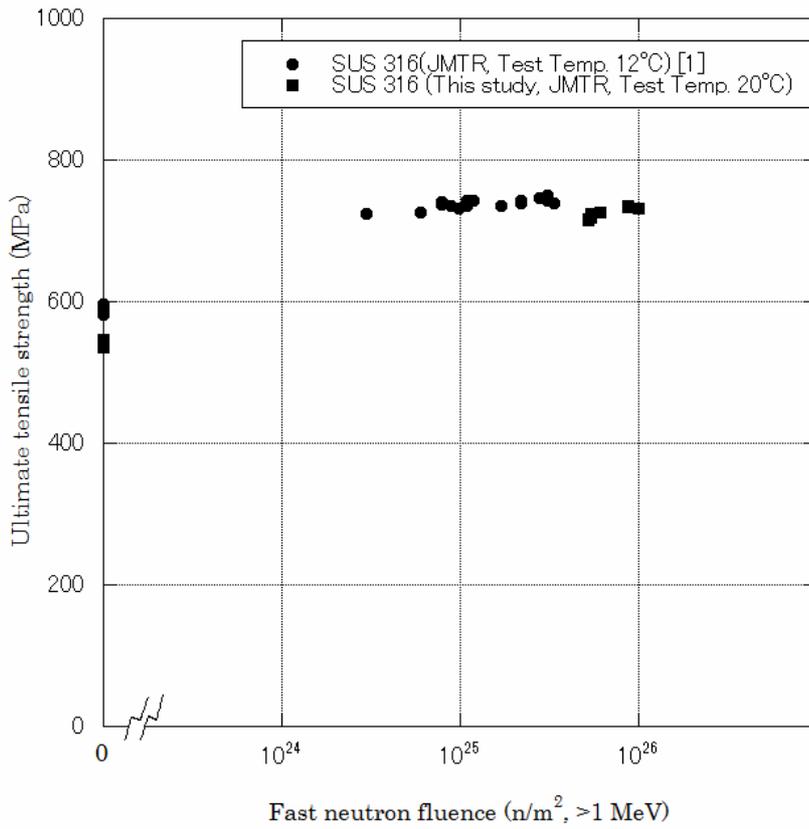


Fig.5 Effect of fast neutron fluence on ultimate tensile strength

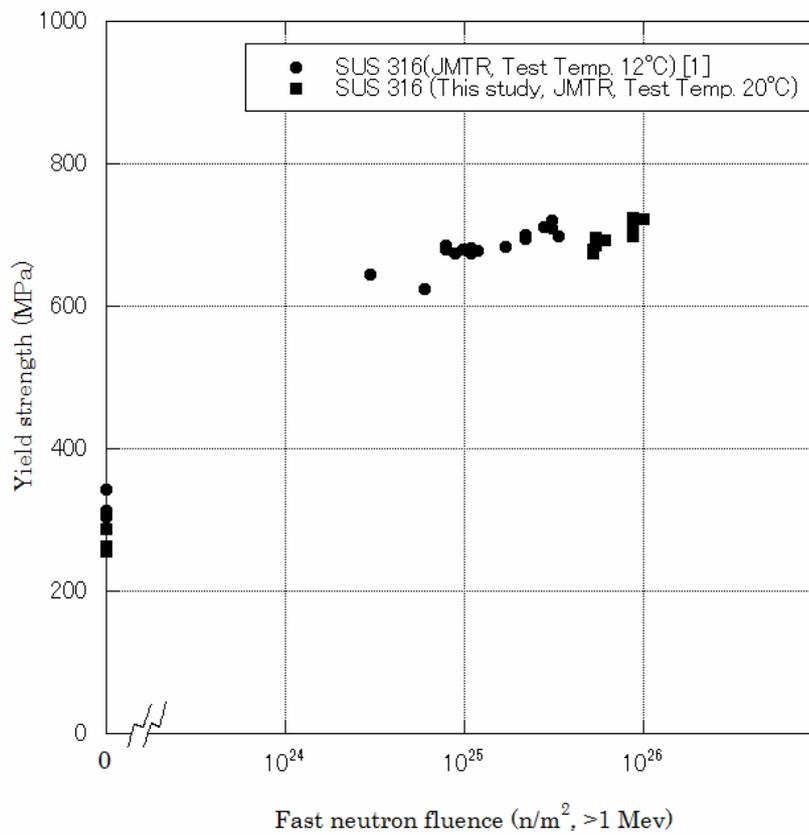


Fig. 6 Effect of fast neutron fluence on yield strength

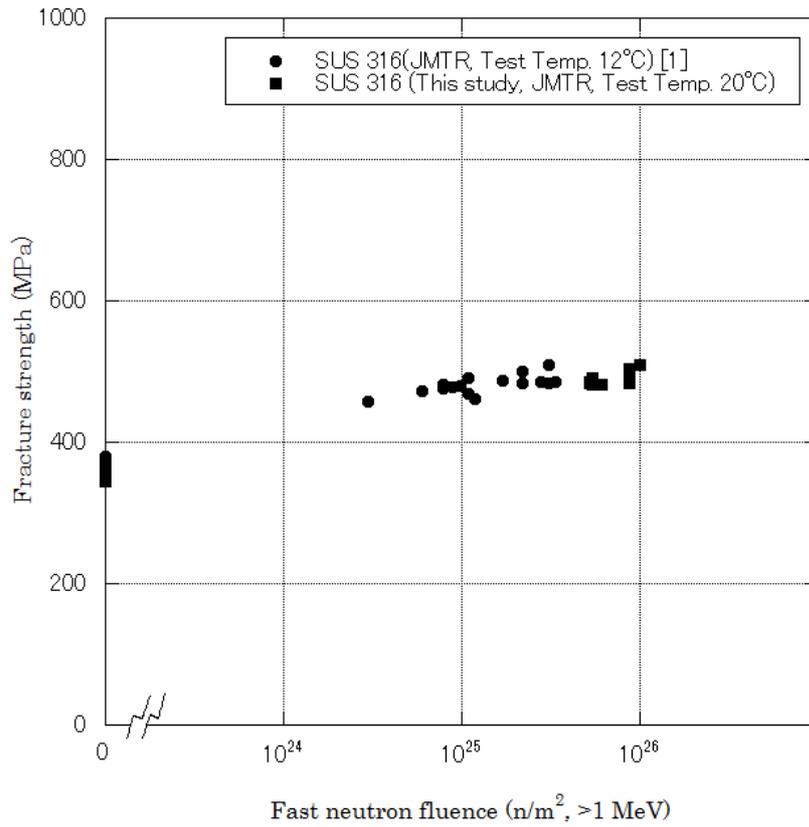


Fig. 7 Effect of fast neutron fluence on fracture strength

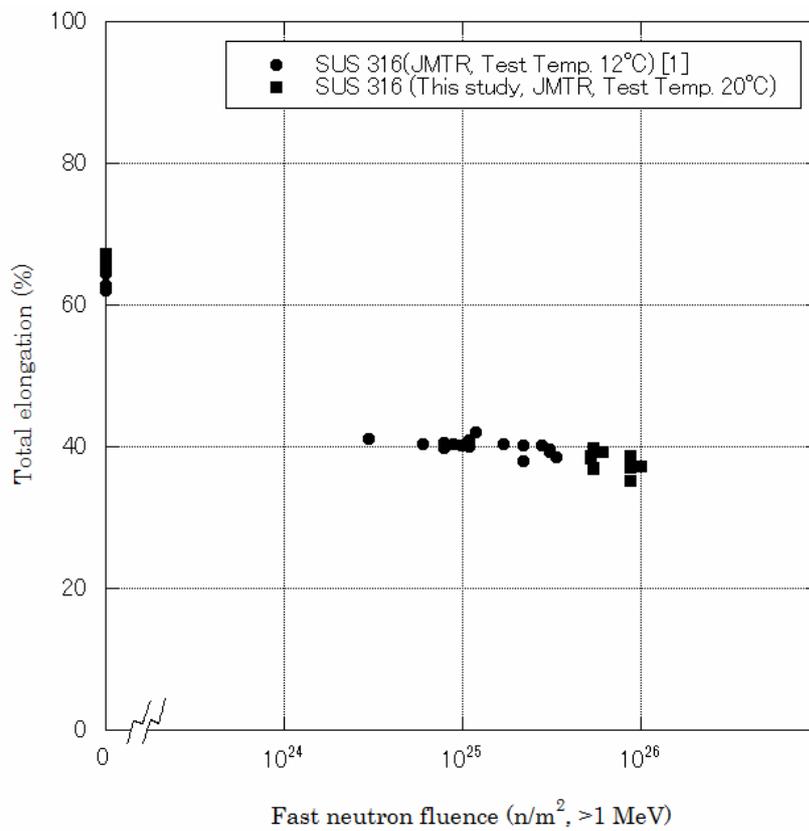


Fig. 8 Effect of fast neutron fluence on Total elongation

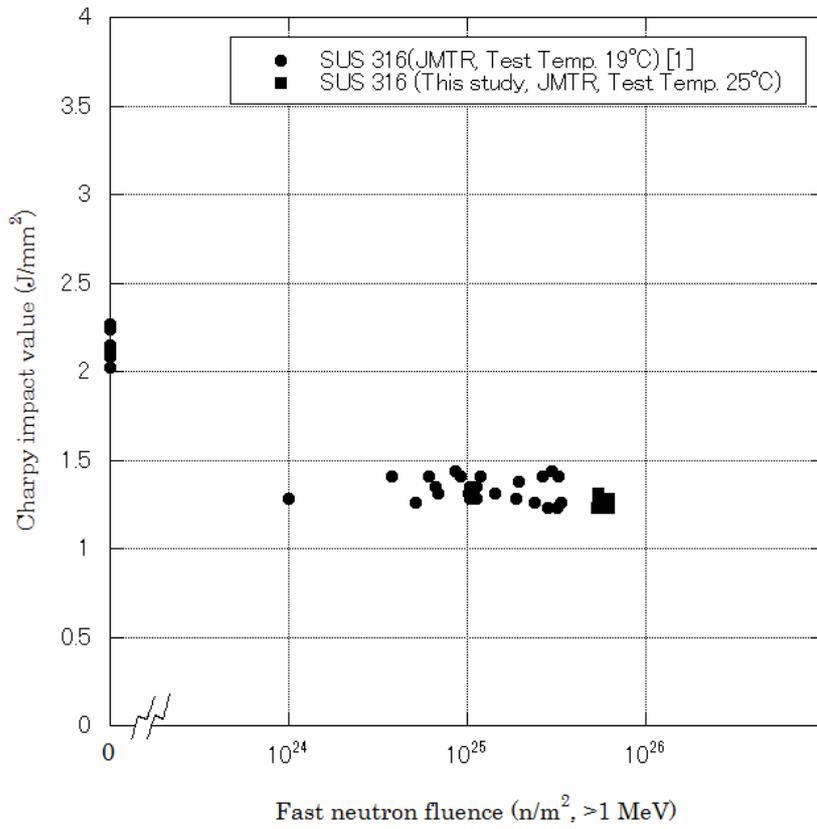


Fig. 9 Effect of fast neutron fluence on Charpy impact value

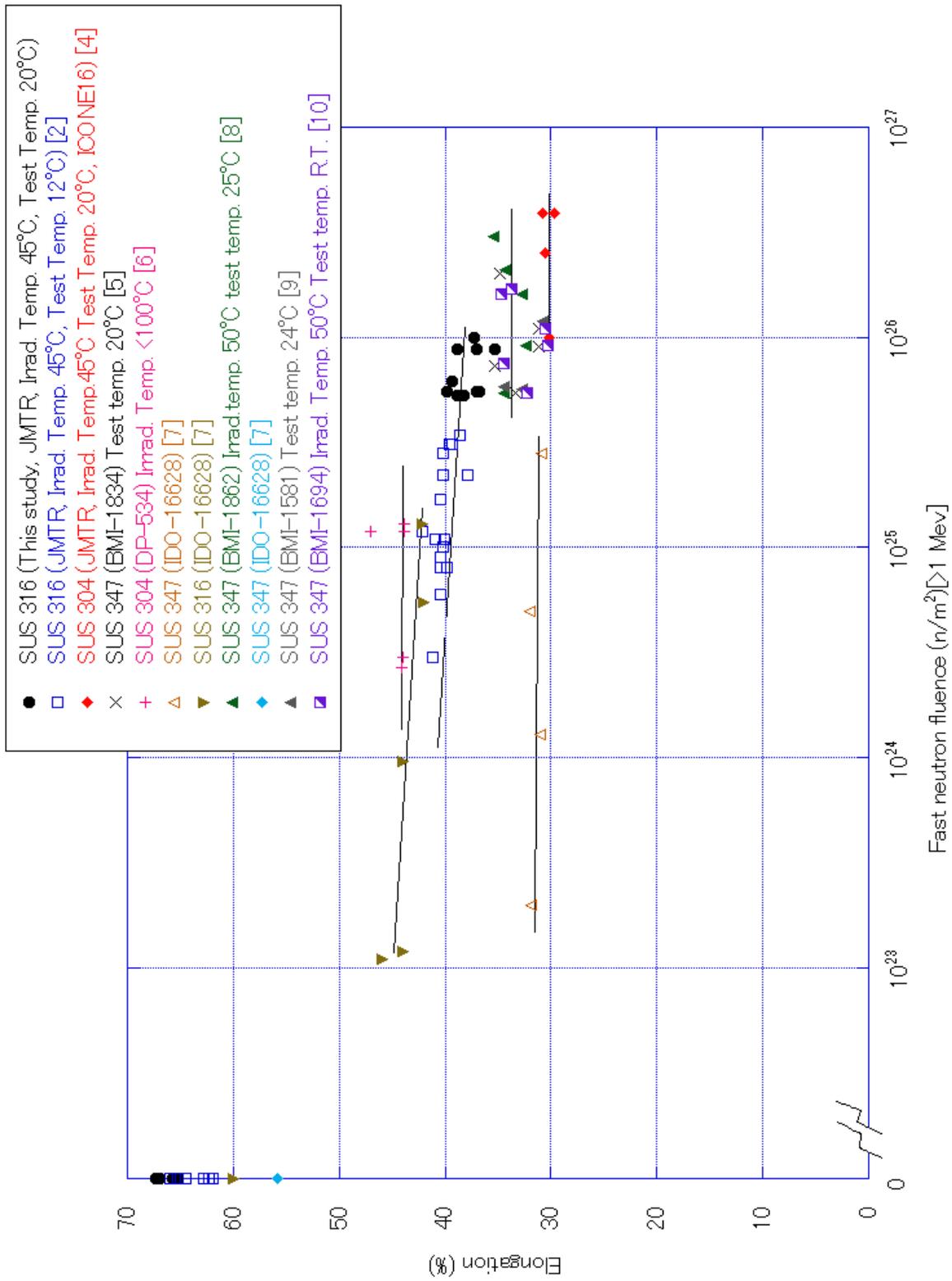


Fig. 10 Effect of fast neutron fluence on tensile elongation

付録 衝撃試験後の破面観察写真

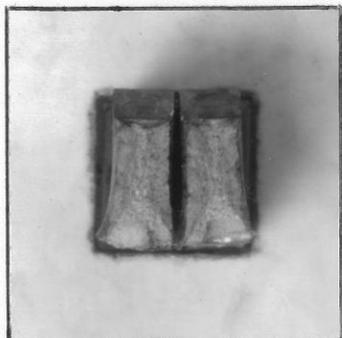


PHOTO No. 30423 試験片番号 5

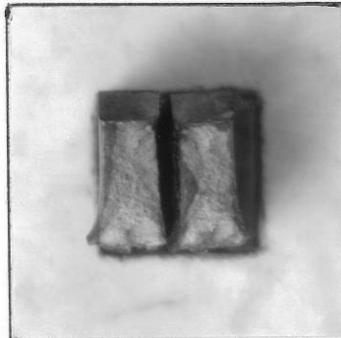


PHOTO No. 30424 試験片番号 6

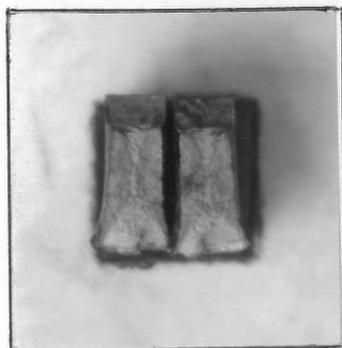


PHOTO No. 30425 試験片番号 7

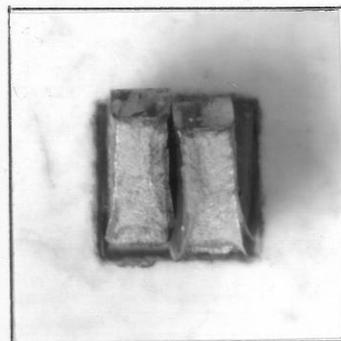


PHOTO No. 30426 試験片番号 8

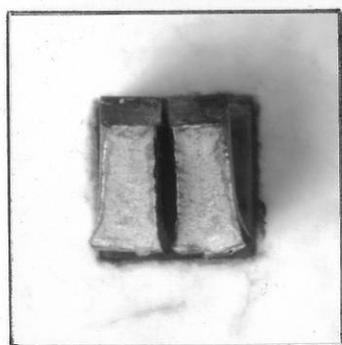


PHOTO No. 30427 試験片番号 9

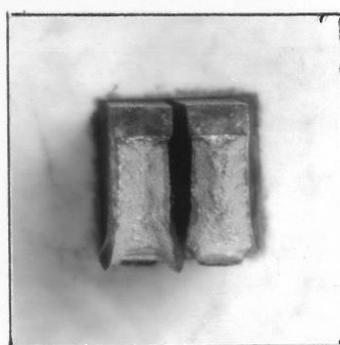
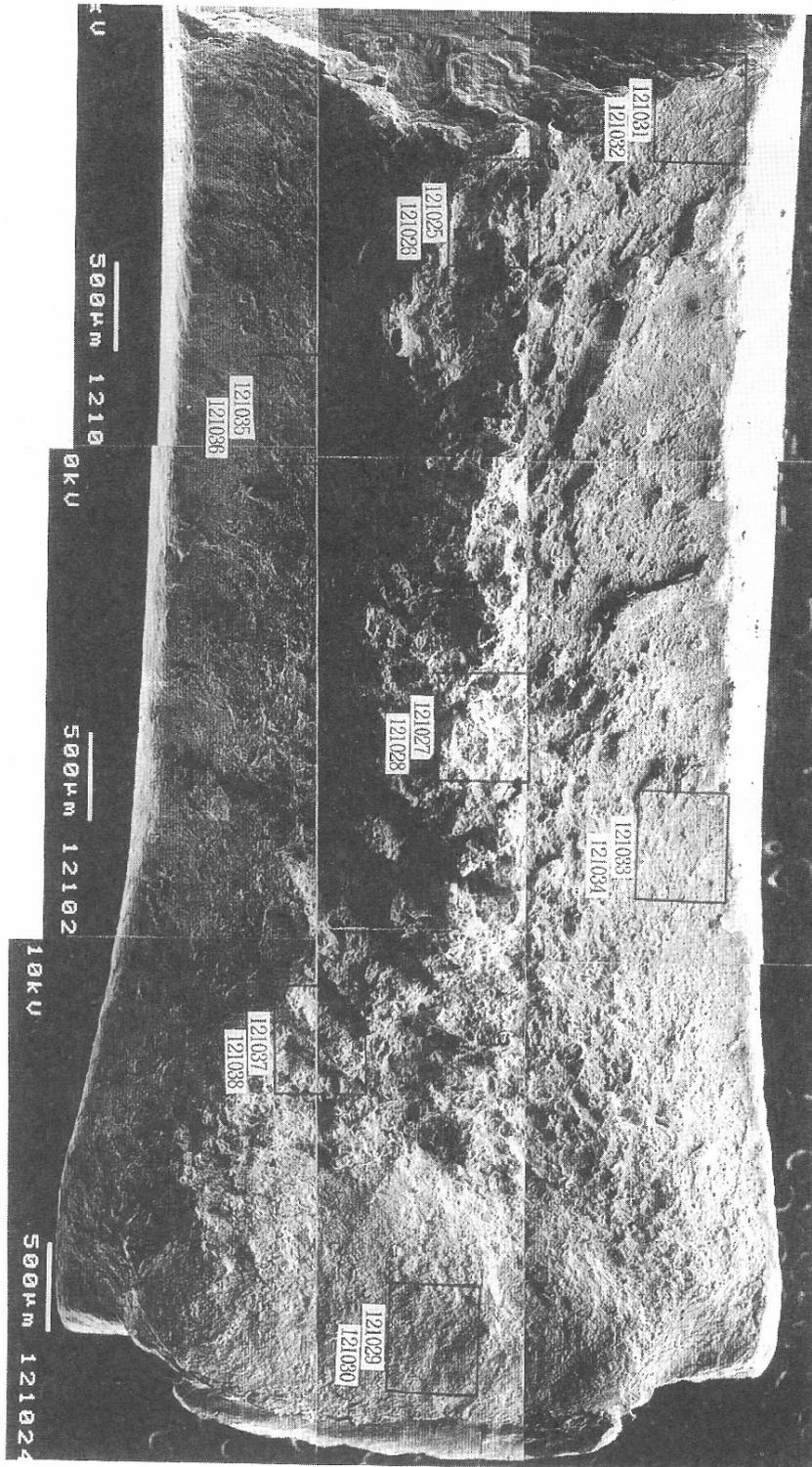


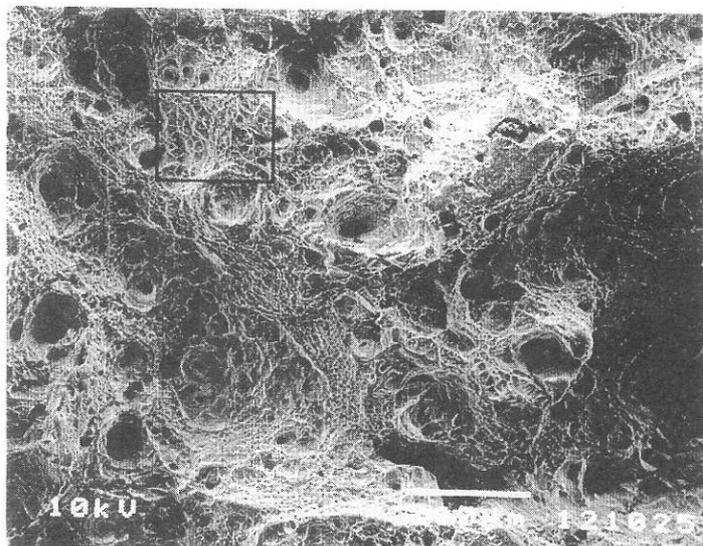
PHOTO No. 30428 試験片番号 10

Photo 1 Fractgraph of impact specimens

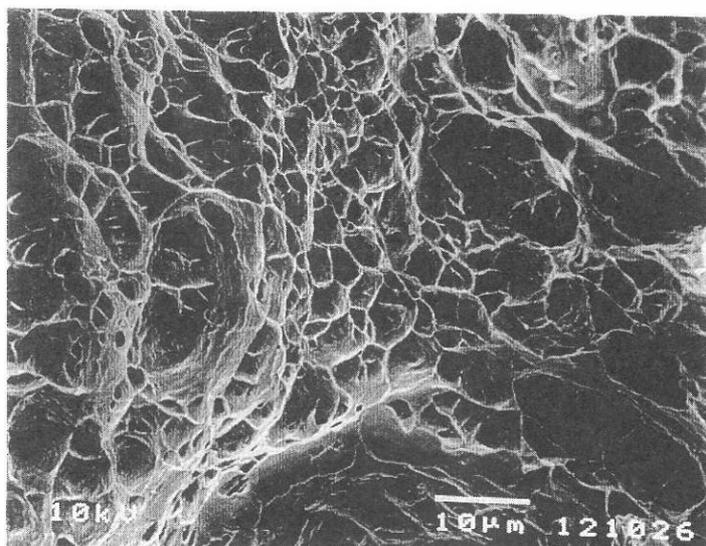


(Capsule ID: 76M-12J, Specimen ID : CH10)

Photo 2 SEM image of impact specimen

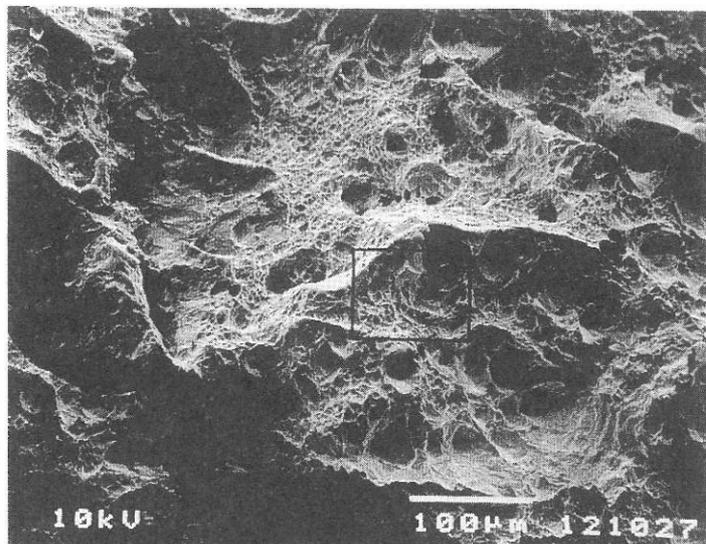


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121025

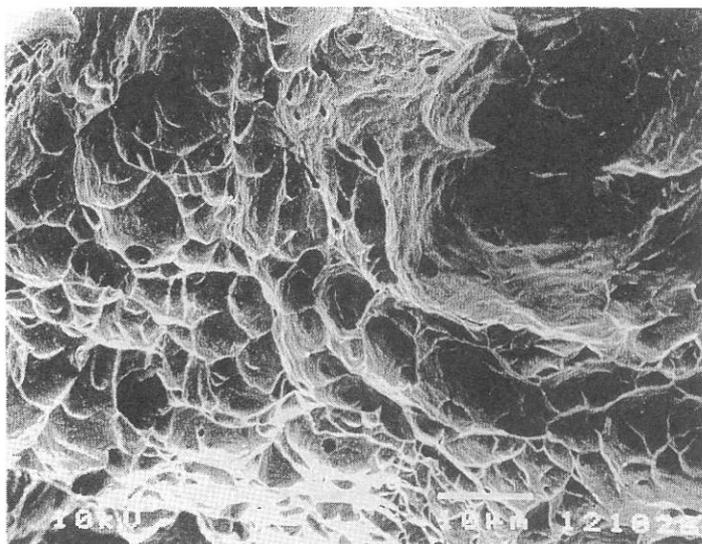


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121026

Photo 3 SEM image of impact specimen

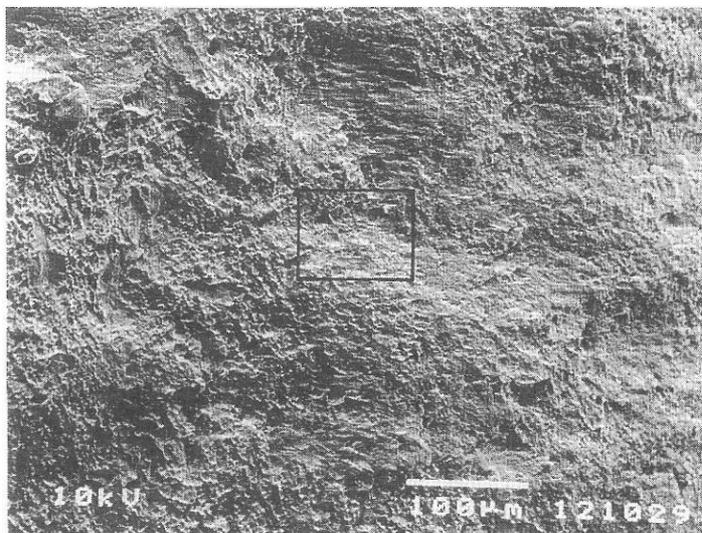


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121027

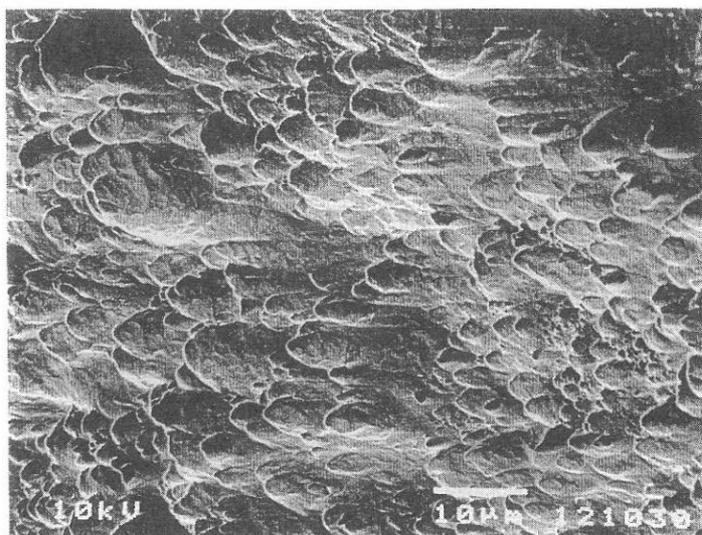


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121028

Photo 4 SEM image of impact specimen

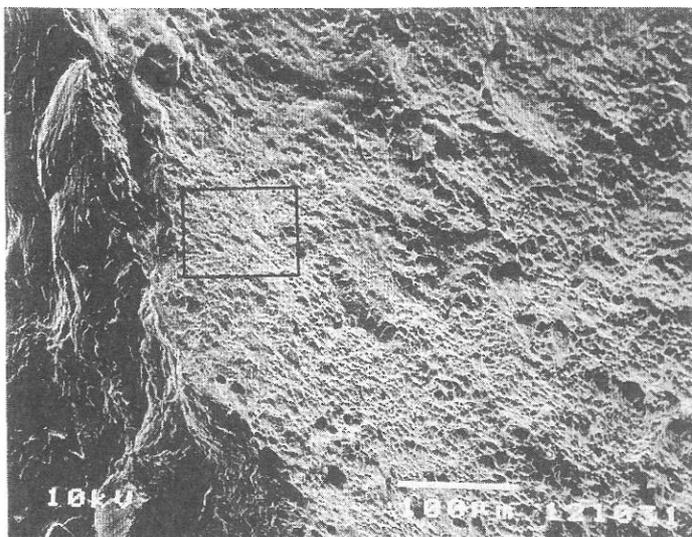


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121029

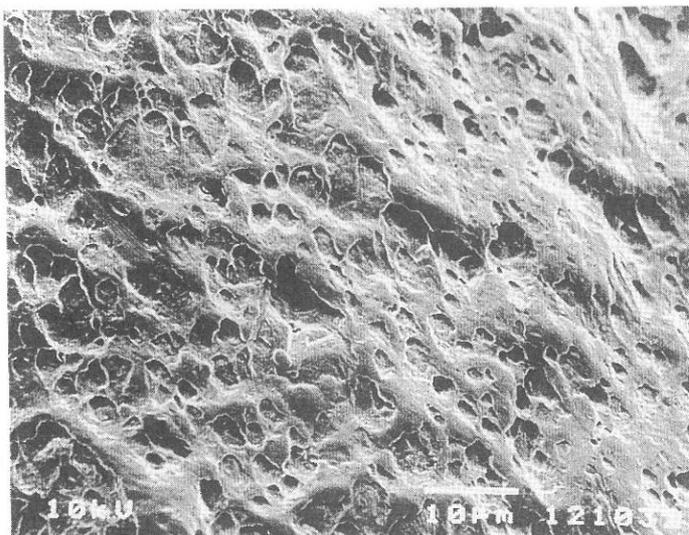


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121030

Photo 5 SEM image of impact specimen

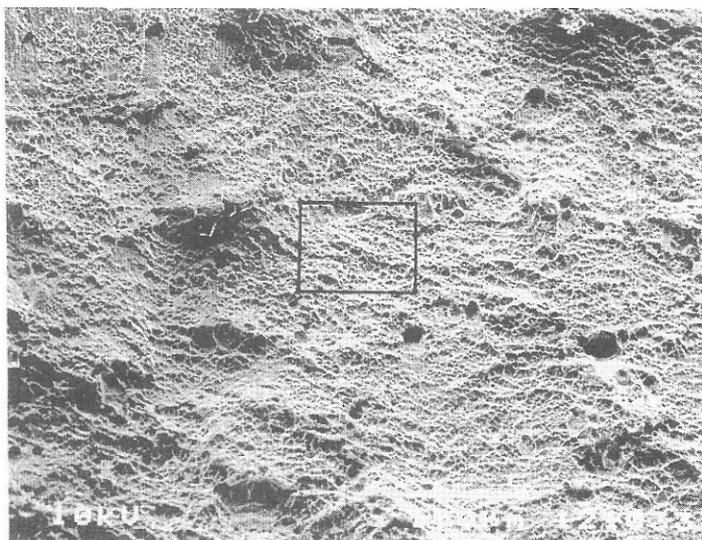


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121031

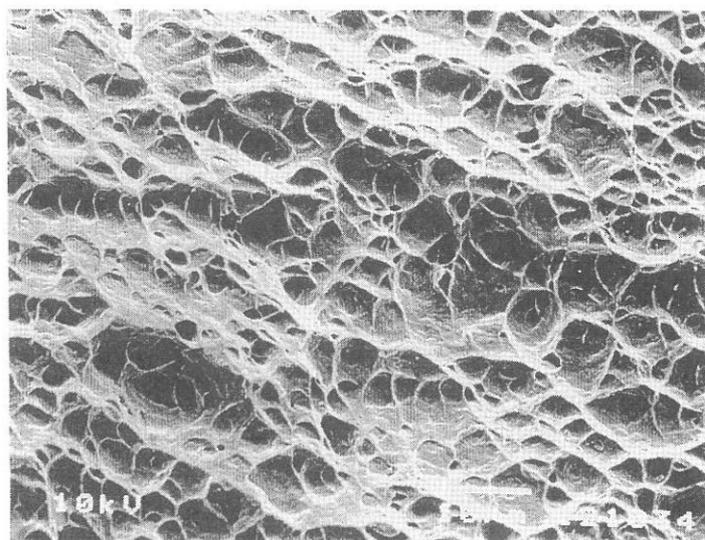


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121032

Photo 6 SEM image of impact specimen

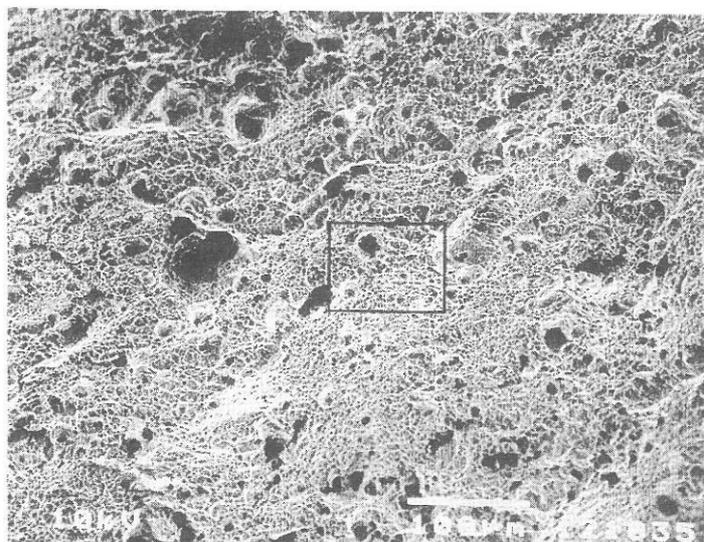


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121033

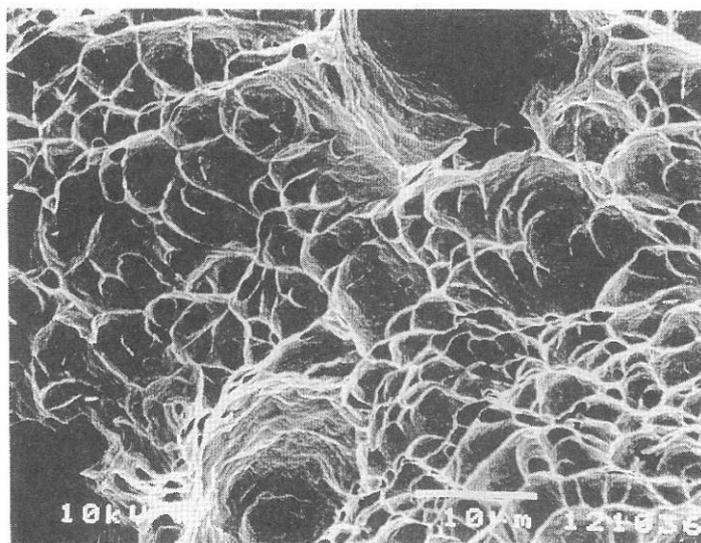


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121034

Photo 7 SEM image of impact specimen

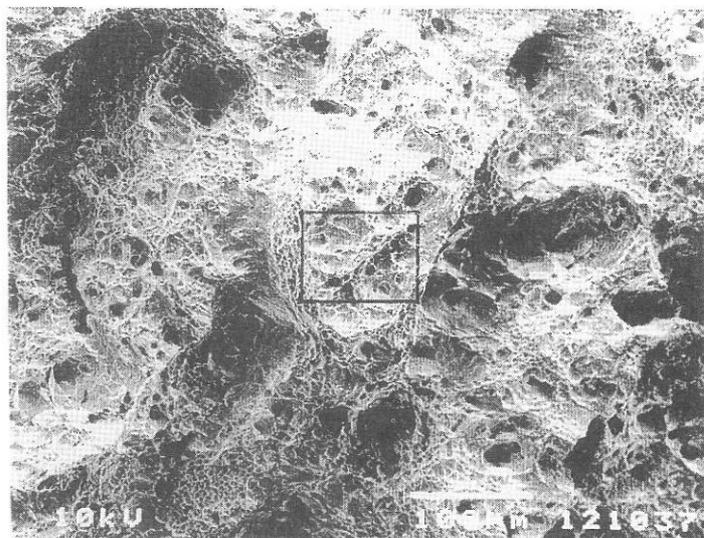


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121035

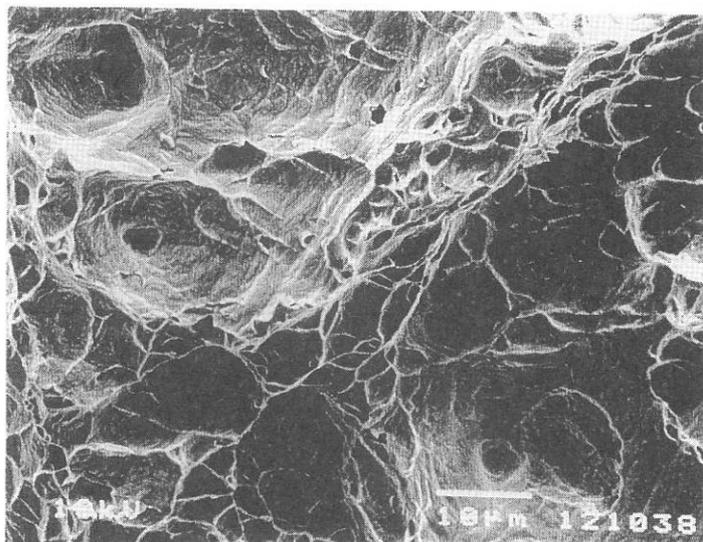


試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121036

Photo 8 SEM image of impact specimen



試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×190
写真番号	121037



試料番号	CH10
撮影イメージ	SEI
写真倍率	×1450
写真番号	121038

Photo 9 SEM image of impact specimen

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

