

JAERI-M
86-007

JMTR炉心構造材のサーベランス・テスト

1986年2月

武田 卓士・雨沢 博男・飛田 健治

JAERI-M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。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319 11 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

JMTR 炉心構造材のサーベランス・テスト

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

武田卓士・雨沢博男・飛田健治

(1986年1月21日受理)

1966年以来実施してきた JMTR 炉心構造材のサーベランス・テストがほぼ終了した。計画されたキャプセルは、継続照射中のベリリウム試料組込の1本を除き、全て炉心から JMTR ホットラボに移され、照射後試験が実施された。

得られたデータは、炉心要素等の供用期間中の健全性を保つための計画である“JMTR 炉心要素管理計画”に反映される。

JMTR のサーベランス・テストでは、高中性子束の環境下におかれる各種材料、反射体として使用されるベリリウム、中性子吸収体として使用されるハフニウム、吸収体ローラのバネ等に使用される 17-4 PH，格子板に使用されている SUS 304 について実施した。

得られた結果を本報告書に示す。

Surveillance test of the JMTR core components

Takashi TAKEDA, Hiroo AMEZAWA and Kenji TOBITA

Department of JMTR project,
Oarai Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 21, 1986)

Surveillance test for the core components of Japan Materials Testing Reactor (JMTR) was started in 1966, and completed in 1985 without one capsule. Most of capsules in the program, except one beryllium specimens, were removed from the core, and carried out the post-irradiation tests at the JMTR Hot Laboratory.

The data is applied to review of JMTR core components management plan.

JMTR surveillance test was carried out with several kind of materials of JMTR core components, Beryllium as the reflector, Hafnium as the neutron absorber of control rod, 17-4PH stainless steel as a roller spring of the control rod, and 304 stainless steel as the grid plate.

Results are described in this report.

Keyword: Core Component, Beryllium, Hafnium, 17-4PH, SUS 304, Irradiation Effect, Irradiation Damage.

目 次

1. はじめに	1
2. サーベランス計画	1
2.1 炉心構造材のサーベランス試験	1
2.2 試験片の採取	2
2.3 試験片の形状	2
2.4 試験片の数量	3
2.5 照射キャプセル	3
3. 照射条件	4
3.1 照射位置	4
3.2 中性子照射量	4
3.3 照射温度	4
4. 試験条件	4
4.1 未照射試験	4
4.2 照射後試験	5
4.3 試験機	5
4.4 試験時の条件	6
5. 試験結果と検討	6
5.1 ベリリウム	6
5.2 ハフニウム	9
5.3 17-4 PH	9
5.4 SUS 304	10
5.5 SUS 304 L	10
6. あとがき	11
参考文献	14

表 目 次

1. ベリリウム材の化学成分	16
2. 照射キャプセルおよび試験片一覧	19
2. (続)照射キャプセルおよび試験片一覧	20
3.1 ベリリウム引張試験データ(NGK)	22
3.2 "	23
3.3 " (KBI)	24
3.4 "	25
3.5 "	26
3.6 "	27
4.1 ベリリウム衝撃試験データ(NGK)	30
4.2 " (KBI)	31
4.3 "	32
5. ベリリウム衝撃試験片の質量測定	34
6. 電子顕微鏡観察によるベリリウム中のヘリウム量	38
7. ハフニウム材の化学成分	39
8. ハフニウム引張試験データ	40
9. ハフニウム衝撃試験データ	42
10. SUS 304, 17-4 PH, SUS 304 Lの化学成分	44
11. 17-4 PH引張試験データ	45
12. 17-4 PH衝撃試験データ	46
13. SUS 304引張試験データ	49
14. SUS 304 L引張試験データ	51
15. SUS 304 L硬さ試験データ	53

図目次

図 1.	テストピースの形状	17
図 1.	(続)テストピースの形状	18
図 2.	小キャプセルの位置と高速中性子照射量の関係	21
図 3.	ベリリウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係 (NGK材)	28
図 4.	ベリリウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係 (KBI材)	29
図 5.	ベリリウムの高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係	33
図 6.	高速中性子照射量と腐食減量の関係	35
図 7.	ベリリウムの応力-歪線図 その1	36
図 8.	ベリリウムの応力-歪線図 その2	37
図 9.	ハフニウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係	41
図10.	ハフニウムの高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係	43
図11.	17-4 PHの高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係	47
図12.	17-4 PHの高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係	48
図13.	SUS 304の高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係	50
図14.	SUS 304 Lの高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係	52

附 録

A.	照射キャプセルの外観写真	54
B. 1	ベリリウム衝撃試験片表面写真	55
B. 2	ハフニウム衝撃試験片断面写真	56
B. 3	ベリリウム衝撃試験片断面写真	56
C. 1	未照射ベリリウムの電顕写真	57
C. 2	$1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真	58
C. 2	(続) $1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真 900℃, 1時間焼鈍	59
C. 3	$4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真	60
C. 3	$4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真 600℃, 1時間焼鈍	61
C. 3	(続) $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真 700℃, 1時間焼鈍	62

Contents

1. Introduction	1
2. Surveillance program	1
2.1 Surveillance test of core components	1
2.2 Cutting of test piece	2
2.3 Shape of test piece	2
2.4 Number of test piece	3
2.5 Capsule	3
3. Irradiation condition	4
3.1 Location	4
3.2 Neutron fluence	4
3.3 Irradiation temperature	4
4. Test condition	4
4.1 Unirradiated test	4
4.2 Post-irradiated test	5
4.3 Testing machine	5
4.4 Test condition	6
5. Results and discussion	6
5.1 Beryllium	6
5.2 Hafnium	9
5.3 17-4PH	9
5.4 SUS 304	10
5.5 SUS 304L	10
6. Afterword	11
Reference	14

Tables

1	Chemical composition of beryllium	16
2	List of capsules and specimens	19
2(cont.)	List of capsules and specimens	20
3.1	Tensile test data of unirradiated and irradiated beryllium	22
3.2	"	23
3.3	"	24
3.4	"	25
3.5	"	26
3.6	"	27
4.1	Impact test data of unirradiated and irradiated beryllium	30
4.2	"	31
4.3	"	32
5	Corrosion weight loss data of irradiated beryllium	34
6	The data of helium bubble diameter and density in the irradiated beryllium specimen by the electron microscopy	38
7	Chemical composition of hafnium	39
8	Tensile test data of unirradiated and irradiated hafnium	40
9	Impact test data of unirradiated and irradiated hafnium	42
10	Chemical composition of SUS 304, 17-4PH, SUS 304L	44
11	Tensile test data of unirradiated and irradiated 17-4PH	45
12	Impact test data of unirradiated and irradiated 17-4PH	46
13	Tensile test data of unirradiated and irradiated SUS 304	49
14	Tensile test data of unirradiated and irradiated SUS 304L	51
15	Hardness data of irradiated SUS 304L	53

Figures

1	Test piece	17
1(cont.)	Test piece	18
2	Location of test piece holder in irradiated capsule VS. fast neutron fluence	21
3	Tensile strength and elongation VS. fast neutron fluence for beryllium (NGK)	28
4	Tensile strength and elongation VS. fast neutron fluence for beryllium (KBI)	29
5	Absorption energy in impact test VS. fast neutron fluence for beryllium	33
6	Corrosion weight loss VS. fast neutron fluence for beryllium	35
7	Typical stress-strain curves for irradiated and unirradiated beryllium (1)	36
8	Typical stress-strain curves for irradiated and unirradiated beryllium (2)	37
9	Tensile strength and elongation VS. fast neutron fluence for hafnium	41
10	Absorption energy of impact test VS. fast neutron fluence for hafnium	43
11	Tensile strength and elongation VS. fast neutron fluence for 17-4PH ...	47
12	Absorption energy of impact test VS. fast neutron fluence for 17-4PH ...	48
13	Tensile strength and elongation VS. fast neutron fluence for SUS 304 ...	50
14	Tensile strength and elongation VS. fast neutron fluence for SUS 304L ...	52

Appendix

A	Overview of capsule	54
B.1	Irradiated beryllium specimen	55
B.2	Fracture surface of irradiated hafnium impact specimen	56
B.3	Fracture surface of irradiated beryllium impact specimen	56
C.1	Transmission electron micrograph of beryllium, unirradiated ...	57
C.2	Transmission electron micrograph of beryllium, irradiated 1.1 x 10 ²⁴ m ⁻²	58
C.2(cont.)	Transmission electron micrograph of beryllium, irradiated 1.1 x 10 ²⁴ m ⁻² , annealed 900°C 1 hour	59
C.3	Transmission electron micrograph of beryllium, irradiated 4.6 x 10 ²⁵ m ⁻²	60
C.3(cont.)	Transmission electron micrograph of beryllium, irradiated 4.6 x 10 ²⁵ m ⁻² , annealed 600°C 1 hour	61
C.3(cont.)	Transmission electron micrograph of beryllium, irradiated 4.6 x 10 ²⁵ m ⁻² , annealed 700°C 1 hour	62

1. はじめに

JMTRの炉心は、中性子反射材としてベリリウム材とアルミニウム材、格子板としてSUS 304、制御棒吸収体にハフニウム、吸収体バネ材に17-4PH等を用いて構成されており、圧力容器材はSUS 304Lである。

これら構造材の中性子照射による機械的性質の変化等を把握し、適正な管理のもとに大きな損傷に至る前に交換したり、損傷緩和の対策を講ずる必要がある。

この目的のためにテストピースの加速照射によるサーベランステスト計画がJMTR運転開始前に企画された。計画では、JMTRの炉心構造材の限界高速中性子照射量を 10^{26}m^{-2} 程度において、各種構造材のテストピースの中性子照射量を数段階に区分し、各照射量毎に照射キャプセルを設け、照射を実施した。

計画されたサーベランステストの照射後試験を一部を除いて完了したのでここに報告する。

2. サーベランス計画

2.1 炉心構造材のサーベランス試験

サーベランステストが企画された頃、先ず必要と考えられた材質は以下の通りである。

1. 原子炉圧力容器 SUS 304 L
2. 格子板 SUS 304
3. 中性子吸収体 ハフニウム (Hf)
4. ベリリウム反射体 ベリリウム (Be)

更につけ加えなければならない材質として制御要素の結合爪・案内ローラバネ材などに使用されている17-4PHを選択した。アルミニウム材については、従来非常に多くの実験例があること、また場合によっては、アルミニウム反射体、ループ周辺要素などを試料とすることも可能であることから特にサーベランステストを必要としないと判断された。

当時、ハフニウム材については SHIPPING PORT での照射後試験データ^{1,2)}、17-4PH材についてはETRでのデータ³⁾が報告されており、 10^{25}m^{-2} 前半での照射挙動はある程度判明していたが、JMTRでは 10^{26}m^{-2} 程度まで使用する計画であったため、サーベランステストを実施することとした。

JMTR炉心構造材とサーベランステストの対象材料を以下に示す。

ベリリウム材については、当初計画した試料の1/3程を照射後試験時に破損したことから、新規に製作されたベリリウム反射体要素(ベリリウム棒及びベリリウム反射体)の素材の製法・製作会社に変更されたことにより3本のキャプセルが追加された。

1. はじめに

JMTRの炉心は、中性子反射材としてベリリウム材とアルミニウム材、格子板としてSUS 304、制御棒吸収体にハフニウム、吸収体バネ材に17-4PH等を用いて構成されており、圧力容器材はSUS 304Lである。

これら構造材の中性子照射による機械的性質の変化等を把握し、適正な管理のもとに大きな損傷に至る前に交換したり、損傷緩和の対策を講ずる必要がある。

この目的のためにテストピースの加速照射によるサーベランステスト計画がJMTR運転開始前に企画された。計画では、JMTRの炉心構造材の限界高速中性子照射量を 10^{26}m^{-2} 程度において、各種構造材のテストピースの中性子照射量を数段階に区分し、各照射量毎に照射キャプセルを設け、照射を実施した。

計画されたサーベランステストの照射後試験を一部を除いて完了したのでここに報告する。

2. サーベランス計画

2.1 炉心構造材のサーベランス試験

サーベランステストが企画された頃、先ず必要と考えられた材質は以下の通りである。

1. 原子炉圧力容器 SUS 304 L
2. 格子板 SUS 304
3. 中性子吸収体 ハフニウム (Hf)
4. ベリリウム反射体 ベリリウム (Be)

更につけ加えなければならない材質として制御要素の結合爪・案内ローラバネ材などに使用されている17-4PHを選択した。アルミニウム材については、従来非常に多くの実験例があること、また場合によっては、アルミニウム反射体、ループ周辺要素などを試料とすることも可能であることから特にサーベランステストを必要としないと判断された。

当時、ハフニウム材については SHIPPINGポートでの照射後試験データ^{1,2)}、17-4PH材についてはETRでのデータ³⁾が報告されており、 10^{25}m^{-2} 前半での照射挙動はある程度判明していたが、JMTRでは 10^{26}m^{-2} 程度まで使用する計画であったため、サーベランステストを実施することとした。

JMTR炉心構造材とサーベランステストの対象材料を以下に示す。

ベリリウム材については、当初計画した試料の1/3程を照射後試験時に破損したことから、新規に製作されたベリリウム反射体要素(ベリリウム棒及びベリリウム反射体)の素材の製法・製作会社に変更されたことにより3本のキャプセルが追加された。

材 料	主 要 使 用 箇 所	サーベランス 対 象	高中性子束の領域 で使用される材料
ベリリウム	反射体要素, 枠	○	○
アルミニウム	反射体要素, 制御棒案内管		○
ハフニウム	制御棒吸収体	○	○
17-4PH	吸収体バネ材	○	○
SUS 304	吸収体ローラー, 炉心格子板	○	○
SUS 304L	原子炉圧力容器	○	
ジルカロイ 2	ガンマ線しゃへい板		

2.2 試験片の採取

試験片のうちハフニウム, 17-4PH, SUS 304は構造材の材料と同一のものを, 同様の加工, 熱処理等を施し試験片とした。

圧力容器材のSUS 304Lについては, 母材部, 溶接部及び熱影響部から試験片を採取し, 計3種類とした。当初のベリリウム構造材(JMTR建設時から1970年までに購入したベリリウム要素, 初代ベリリウム^{*1} 枠およびB 001~B 055の反射体)の原材料は国産品(NGK^{*2})であり, 照射データの比較のために米国Brush^{*3}の材料からの試験片も組込んだ。国産のベリリウム材の製造方法はBrush社の製造方法と異なりホットプレス後押し加工を施しているため異方性が強く, 押し出し方向及び押し出し直角方向の区別をして試験片を採取した。

JMTRで購入するベリリウム構造材の素材はNGKの金属ベリリウムの製造中止に伴い1975年から1979年まで米国KBI^{*4}製に変更された。KBIの製法はBrush社と同じくホットプレスであり, 同社製のベリリウム要素は第2回目のベリリウム枠とB 056~B 062(但しB 059はNGK製)のベリリウム反射体要素である。このKBI製のベリリウム枠用のLOT(No.628, No.715)からサーベランス用試験片が切出され, 3本の照射キャプセル(76M9J, 74M51J, 76M52J)に組まれて照射された。

KBIの製造中止にともない1981年以降はBrush社の素材を使用している。

NGK, KBIのベリリウム材の規格はいずれもBrush社のN-200A相当であり仕様上, 化学的組成, 機械的性質とも変りない。

NGK, KBI, Brush社のベリリウム材の化学成分を表-1に示す。微量元素については, 分析メーカ, 分析方法によりその値に相当開きがある。

2.3 試験片の形状

各材料の引張試験用試験片及び衝撃試験用試験片は, 原則としてJIS規格に準じて製作されたが, 照射キャプセル内の固定方法などから一部形状を変更したものもある。ベリリウム材の衝

* 1 1975年, 原子炉積算熱出力量24,017 MW・dまで使用された。

* 2 NGK : 日本碍子株式会社

* 3 Brush : Brush wellman Inc

* 4 KBI : KAWACHI BERYLCO INDUSTRIES, INC

撃試験片は当初5.56 mm[□]であったが、吸収エネルギーが少なすぎるためKBI材の試験片として追加されたものは、10 mm×5 mmに変更された。形状及び寸法を図-1に示す。

各試験片別の参考にした規格は次の通りである。

材 質	参考にした J I S 規格		備 考
	引張試験片	衝撃試験片	
ベリリウム	J I S 3号		衝撃試験片はノッチのないものとした。
ハフニウム	J I S 7号	J I S 4号	
17-4PH	J I S 3号	J I S 4号	
SUS 304	J I S 7号		
SUS 304L	J I S 10号	J I S 4号	

試験片は、JIS 4号、10号規格には準拠しているが、JIS 3号、7号規格については、試料の入手、炉心装荷の都合、他の試験データとの比較の都合上形状が似ているのみで寸法が異なっている。

2.4 試験片の数量

材料の特性として試験データのばらつき易いものについては、試験片の数量を計画的に増したが、照射キャプセル数、キャプセルへの挿入数の制限から全体数量が抑えられている。詳細本数を表2に示す。

2.5 照射キャプセル

照射キャプセルは試料の周辺を原子炉の1次冷却水が流れるバスケット型で外径32 mm φのものである。

核的に影響の大きい材料は2～3個の試験片を、影響の小さいものは5～6個をアルミニウムもしくはステンレスのホルダーに固定して小キャプセルを作り、この小キャプセルをステンレス製のバスケット内に最高10個まで挿入して1本の照射キャプセルとした。

サーベランステストのため計画した照射キャプセルは当初は5本、ベリリウム材用に追加された3本のキャプセルを加えて計8本である。照射計画は目標照射量別にキャプセルを作成し、照射期間の途中において一部の小キャプセルを取出すことを避けたとされる。

中性子照射量を評価するために、Fe、Ni およびCo-A ℓ 線から成るフラックスモニタワイヤ1～2本を小キャプセル全てに挿入した。

試験片の中性子照射量を明確にする目的と小キャプセル中に異種材料の試験片が混在することによる区別を明確にする目的で、小キャプセルの試験片固定位置別に番地を設け、キャプセル軸方向に対する小キャプセルの配列と合せて管理された。

キャプセル内の小キャプセルの配列と高速中性子照射量を図-2に示す。

3. 照射条件

3.1 照射位置

圧力容器材のキャプセルを除く全てのキャプセルはJMTR燃料領域の照射孔(H-7, H-9, J-7, J-9)で照射された。圧力容器材のキャプセルは圧力容器壁内側0.12mにある照射ラックで照射した。

3.2 中性子照射量

サーベランス計画が作成された段階では、小キャプセル毎に挿入されたフラックスモニタワイヤの計測によって中性子照射量を評価する予定であった。

しかし、照射後試験の工程の都合上キャプセル毎の最適の時期にモニタワイヤを計測することができなかったことと、モニタワイヤの照射量が大きすぎたり小さすぎたりで測定不可能となった。

従って中性子照射量のデータは全て核計算によって得たものである。

核計算に使用したコードは、第2～第18運転サイクルはPDQ, 第19～第33運転サイクルはEXTERMINATOR-2, 第35運転サイクル以降はCITATIONである。

小キャプセル毎、試験片毎の高速中性子照射量を表2及び図-2に示す。

3.3 照射温度

試験片は全て原子炉の1次冷却水に接しており、1次冷却水の入口温度は最大49℃、通常は45℃程である。粗い計算による試験片の温度*は以下の通りである。

試験片名	試験片表面温度	試験片中心温度
ハフニウム 引張試験片	87℃	96℃
ハフニウム 衝撃試験片	139℃	190℃
17-4PH 引張試験片	66℃	77℃
17-4PH 衝撃試験片	73℃	87℃

ベリリウムおよびSUS304試験片の発熱量は少なく原子炉1次冷却水温度と大差無い。

* 試料周辺の冷却水流速2m/s, ハフニウムの γ 発熱量30kw/kgと仮定。

4. 試験条件

4.1 未照射試験

3. 照射条件

3.1 照射位置

圧力容器材のキャプセルを除く全てのキャプセルはJMTR燃料領域の照射孔（H-7, H-9, J-7, J-9）で照射された。圧力容器材のキャプセルは圧力容器壁内側0.12mにある照射ラックで照射した。

3.2 中性子照射量

サーベランス計画が作成された段階では、小キャプセル毎に挿入されたフラックスモニタワイヤの計測によって中性子照射量を評価する予定であった。

しかし、照射後試験の工程の都合上キャプセル毎の最適の時期にモニタワイヤを計測することができなかったこと、モニタワイヤの照射量が大きすぎたり小さすぎたりで測定不可能となった。

従って中性子照射量のデータは全て核計算によって得たものである。

核計算に使用したコードは、第2～第18運転サイクルはPDQ, 第19～第33運転サイクルはEXTERMINATOR-2, 第35運転サイクル以降はCITATIONである。

小キャプセル毎、試験片毎の高速中性子照射量を表2及び図-2に示す。

3.3 照射温度

試験片は全て原子炉の1次冷却水に接しており、1次冷却水の入口温度は最大49℃、通常は45℃程である。粗い計算による試験片の温度*は以下の通りである。

試験片名	試験片表面温度	試験片中心温度
ハフニウム 引張試験片	87℃	96℃
ハフニウム 衝撃試験片	139℃	190℃
17-4PH 引張試験片	66℃	77℃
17-4PH 衝撃試験片	73℃	87℃

ベリリウムおよびSUS304試験片の発熱量は少なく原子炉1次冷却水温度と大差無い。

* 試料周辺の冷却水流速2m/S, ハフニウムの γ 発熱量30kw/kgと仮定。

4. 試験条件

4.1 未照射試験

未照射試験片と照射試験片は可能な限り同一条件で試験することが必要であり、計画時、未照射試験片は照射キャプセル1本に組込まれた数量と等量だけ準備された。しかし照射後試験が開始されるまでの10年間にベリリウムの試験片を除く保管されていた全ての試験片を紛失してしまったため、未照射データを得ることができなかった。

従って未照射データとして試験結果に記されているものは、ベリリウムのデータの1部を除いて全て各要素の製作時に製作者側で試験したデータである。

それぞれのデータの出典は以下の通りである。

(1) ベリリウム (枠)	試験検査成績書	49年8月23日
(2) 304ステンレス (炉心格子板)	炉心部機器検査成績書	42年9月21日
(3) 304Lステンレス (原子炉圧力容器)	原子炉圧力容器成績書	43年5月31日
(4) ハフニウム (制御棒吸収体)	Hf 吸収体検査成績書	43年3月14日
(5) 17-4PHステンレス (吸収体バネ材)	Hf 吸収体検査成績書	43年3月14日

4.2 照射後試験

全ての試験片の照射後試験はJMTRホットラボにおいて実施された。キャプセル名67M44J-4に組込まれた17-4PHの試験片、P-13~P-16は放射能がJMTRホットラボの材料試験セルの取扱い許可量を大幅に超えるため試験を実施せず、試料は廃棄した。当初計画されたベリリウムの試験片は、小キャプセルから試験片を取出すための解体時における破損及び引張試験時におけるネジ部破損により相当数が失われた。ハフニウム試験片は照射による硬度の上昇が著しく、特に $1.1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$)の中性子照射を受けた試験片No.H-10~H-12試験片の引張試験はチャックが試験片にかみつかず困難を極めた。

圧力容器材のSUS304Lの衝撃試験片は、衝撃吸収エネルギーの予想値がJMTRホットラボのシャルピー試験機の試験容量に近い値であったこと、照射量が極めて低く有意な変化が予想されないこと、等から試験を実施せず、試料は一部硬度試験に用いたのみで廃棄した。

4.3 試験機

引張試験機(1)

新興引張試験機 TOM-5000D型

荷重容量 9800N

伸び計 MTS社 MODEL632-11C-20

ベリリウム材の未照射試験片の試験に使用

引張試験機(2)

新興引張試験機 TOM-10000 型
 荷重容量 98000 N
 伸び計 MTS社 MODEL 632-11

JMTR ホットラボにおける照射後試験に使用

衝撃試験機(1)

東京試験機製作所製シャルピー衝撃試験機
 容量 2.94 J
 未照射ベリリウム材の試験に使用

衝撃試験機(2)

東京試験機製作所製シャルピー衝撃試験機
 容量 294 J
 JMTR ホットラボにおける照射後試験に使用

衝撃試験機(3)

東京試験機製作所製シャルピー衝撃試験機
 容量 3.92 J
 67 M 44 J-4 キャプセルのベリリウム材, ハフニウム材の照射後試験に使用

4.4 試験時の条件

未照射試料, 照射試料の引張試験, 衝撃試験とも室温で行なった。

クロスヘッドスピードはベリリウム材は 8.33×10^{-6} m/S, ハフニウム材, SUS 304 材は 8.33×10^{-7} m/S, 17-4 PH, SUS 304 L は 1.67×10^{-6} m/S である。

5. 試験結果と検討

5.1 ベリリウム

ベリリウム材の引張試験データを表3に示す。表3.1, 2はNGKベリリウム材, 表3.3~6はKBIベリリウム材についてのデータである。試験片番号で“LT”とあるのはHot Pressed billetのTOPからLongitudinal方向に切出された試験片であることを, “TT”とあるのはTransverse方向に切出されたことを示す。“LB”, “TB”はbilletのBottom側から同様に切出されたことを示す。単独に“T”あるいは“L”とあるのは, Transverse, Longitudinalを表わす。

図3のNGK材の高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係図には、米国ATR-ETRのサーベランス計画で得られたDirect Tensile Strength, Flexural Strength, Splitting Tensile Strength, Compression Strengthの値も併記した。

JMTRでの試験はDirect Tensileである。ETR-ATRのサーベランス計画における試験片がNakあるいはアルゴン雰囲気であるのに対し、JMTRの試験片は1次冷却水に直接接しており、付録Bに示す通り表面に腐食が見られるにもかかわらず、まとまりのあるデータが得られた。

図3に示すNGKベリリウムと図4に示すKBIベリリウムの照射効果を比較すると、KBIベリリウムの方が強度低下が大きく見える。ATR-ETRのベリリウム材とKBI製のベリリウムは同じホットプレス材であるにもかかわらず、異った傾向を見せているが、その原因は不明である。ATR-ETRのデータから判断してホットプレス材特有の傾向ともいえないようである。更に照射が進んだ場合、強度低下の割合が軽減されるのかこのまま進行するのかは、 10^{26} m^{-2} オーバーを目標に照射中の74 M 52 J キャプセルの照射後試験データによって判明するであろう。

ベリリウムの衝撃試験データを表4.1~3に、高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係を図5に示す。NGKベリリウムの試験片は 5.56 mm^2 、KBIベリリウム材は $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ と寸法が異なり直接的に比較することは不可能である。

NGKベリリウム材のデータのうち高速中性子照射量が $9 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 以外のデータは使用したシャルピー衝撃試験機の容量が不適切であったため、評価に耐えるデータが得られていない。

NGKベリリウム材の衝撃試験データの大半が使用不可能となったため図5においてはKBIベリリウム材の衝撃吸収エネルギーのスケールを $1/2.5$ に変えNGKベリリウム材と便宜的に同一グラフ上で読めるように加工してある。同図から金属ベリリウム材の衝撃吸収エネルギーは中立軸からの距離の約1.5乗に比例し、一般的にいわれる延性材の値より相当小さい。

金属ベリリウム材の照射による衝撃吸収エネルギーの低下は $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ 照射で約 $1/2$ である。

衝撃試験片から測定したNGKベリリウム材の腐食質量増減量の測定データを表5に示す。測定に使用した試験片は67 M 44 J-4キャプセルに組込まれた衝撃試験片でBC-11, BC-12の2つのキャプセルにまとめられていたもので、数量は合計10本である。67 M 44 J-4キャプセルは1970年6月以降炉心に装荷されており、1981年に取出されるまで128ヶ月間、炉心の反射体領域に移動させた短期間を除いて燃料領域の照射孔に存在した。2つの小キャプセルは、それぞれ、 $9 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 、 $1.1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$)の高速中性子照射を受けている。

試料は先ずアセトンで軽くすすぐ程度の洗浄を行なって“脱クラッド前質量”の測定を行なった後、全ての試料を5%硝酸溶液中に15分間浸し“脱クラッド後質量”の測定を行なった。この方法による質量測定データを表5“その1”に示す。

代表的試料について、更にアセトンを浸したベンコットで表面をこすった後測定したデータを表5“その2”に示す。質量測定はセル内で1昼夜乾燥した後実施した。

測定器はメトラ社製 TYPE HE-20 精密天秤, 保証精度 0.1 mg である。

試験に供した 10 本の試験片のうち 3 本は Brush 社の素材であり残りは NGK のものである。測定した 10 本の試料の中で 8 本は照射前に対し減量しているが 2 本は増量していた。腐食減量した試験片の高速中性子照射量と腐食量, 腐食速度の関係を素材メーカー別に表わしたものを図 6 に示す。高速中性子照射量が $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ に近くなると急速に腐食量が増大している。13 mg / m^2 / d の腐食率は, 金属ベリリウムの腐食速度として発表されているデータのなかでは低い方の値といえる。

JMTR で得られたベリリウム材の種々の高速中性子照射量における応力-歪線図を図 7 および図 8 に示す。未照射時, 1~10% 程度の伸びを示すが, $2 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ の照射で 0.1% まで低下し, JMTR の 1 運転サイクルに相当する $3.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ では全く伸びを失う。ヤング率は未照射時と変わらず $27.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ である。従って照射量 $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ を管理目標値としている JMTR にあって, ベリリウム構造材は供用期間中のほとんど全ての期間 "brittle" な状態で使われている。

表 6 に照射ベリリウム, 未照射ベリリウムの電子顕微鏡観察による得られたヘリウムのバブル寸法, バブル密度およびヘリウム生成量を示す。

試験片は未照射, $1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ および $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$) の 3 種類であり, $1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ の試料は 900 °C で 1 時間, $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ の試料は各々 600 °C と 700 °C で焼鈍した試料も観察した。

電顕写真を附録 C に示す。

写真によって明らかのように, $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ までの照射では焼鈍しない限りバブルは観察されない。

$1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ 照射, 900 °C 焼鈍では粒界に添って 120 Å のバブルが見られる。 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射の試料では 600 °C 焼鈍においても 700 °C 焼鈍においても粒内外ともバブルが見られ, 焼鈍温度の上昇につれてバブル径は増している。

バブル内のガス圧力とベリリウムの表面張力が平衡しているとしてガス圧を求めると

$$P = \frac{2\gamma}{r}$$

ここで P : ガス圧 MPa

r : バブルの半径 nm

γ : ベリリウムの表面張力 1.6 N/m^3)

$1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$, 1 時間焼鈍の試験片を例にとると, バブル径は 12 nm であるから, ガス圧は 530 MPa となる。

JMTR で使用しているベリリウム材は, 表 1 に示すようにウラン含有量を分析していないが, 最近 1 次冷却水中の核分裂生成物の発生源調査のため炉心構造材中のウラン含有量の分析が行なわれた。

分析は日本原子力研究所の JRR-2 の気送管を使用して放射化分析法によって行なわれ, 試

料はベリリウム枠用の試験片あるいは加工不良のブロックより採取された。

分析の結果、ウラン含有量はNGK製のベリリウム材が9.6 ppm, KBI製のベリリウム材が42 ppm, Brush製のベリリウム材が24 ppmであった。

5.2 ハフニウム

試験片と同一Lotのハフニウム材の化学成分を表7に示す。ハフニウム材の引張試験結果を表8に、衝撃試験結果を表9に、高速中性子照射量と強度、伸びの関係を図9に、衝撃吸収エネルギーとの関係を図10に示す。

ハフニウムは熱中性子吸収断面積が大きいいため、原子炉内に装荷できる重量が制限され、勢い試験片寸法を小型化せざるを得ず、このため照射が進み硬度の増した試料 ($1.1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ の高速中性子照射を受けたハフニウム材の硬さ(Hv)は459に達した)のGrippingは極めて困難となり専用治具を開発して試験を行なった。図9のハフニウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係には、 SHIPPINGポート⁵⁾とATR⁶⁾におけるハフニウムの試験データも併記してある。

SHIPPINGポートおよびATRのデータは実際に使用された制御棒吸収材から試験片を切出し得たものであり、SHIPPINGポートの炉内での使用条件は冷却水温度 $\sim 288 \text{ }^{\circ}\text{C}$, PH ~ 10 , ATRでのそれは冷却水温度 $\sim 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 計算による最高Metal温度は $149 \text{ }^{\circ}\text{C}$ である。JMTRのハフニウム引張試験片の温度は最高 $96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ と計算される。

ATRの高速中性子照射量は 0.1 Mev 以上の積分中性子束であるため、図9においてはATRの中性子スペクトルをJMTRと等しいと仮定して 1 Mev 以上に換算して表示している。

ATRの $6.8 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$, $E > 1 \text{ Mev}$ ($1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$, $E > 0.1 \text{ Mev}$)のデータはDirect Tensile Testによるものであるが、他のデータはBending Testによる値である。図中に記した値はノッチ無しデータのデータであり、他にノッチ付きの試料も試験しているが大きな差は無い。

JMTRとATRのデータは比較的良く一致しており、この理由は、SHIPPINGポートの照射温度が高いのに対し、ATRとJMTRの照射温度が比較的近いことによると考えられる。

高速中性子照射量 $5 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ で引張強さは未照射材の3倍に達しており、強度の増加が著しい。この照射量で有意な伸びが有るか否かは、この照射量での試験時に伸び計を使用していないため不明である。SHIPPINGポートのデータでは $6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ の照射を受けてもTotal Elongationで15%, Uniform Elongationで4%を示すが、これは高温照射による影響と考えられる。

ハフニウムの衝撃試験データによれば、 $1.2 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ の高速中性子照射により衝撃吸収エネルギーは未照射材の5%にまで低下している。比較的低い照射量におけるデータのばらつきは、試験機の不調によるものと推定される。

5.3 17-4PH

17-4PHの引張試験データを表11に、衝撃試験データを表12に示す。高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係、衝撃吸収エネルギーの関係を図11および図12に示す。図中にはET

Rで得られたデータをIN-1036より引用し併記した。

17-4PH試験片の化学成分をSUS 304, SUS 304Lと共に表10に示す。

5.4 SUS 304

SUS 304の試験結果を表13に、高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係を図13に示す。

5.5 SUS 304L

圧力容器材SUS 304Lのサーベランステストとして、想定されるJMTRの使用期間を4分割した照射期間を持つ4本のキャプセルが圧力容器壁内側の照射ラックに挿入されている。計画当初はJMTRの寿命を20年と仮定し5年, 10年, 15年, 20年の照射期間を予定したが、その後実情に合わせて照射期間を延長してきた。67MRJ-1はJMTRの第33運転サイクル終了後(積算炉出力24017.4 MW·d), 67MRJ-2は第63運転サイクル終了後(積算炉出力51919.5 MW·d)に取出された。

各サーベランス用キャプセルにはフラックスモニタが挿入されており、このモニタワイヤーを計測することにより実際の積算中性子束を算出する予定であったが、既に述べたとおり、装荷したモニタワイヤーの質量の選択が不適切であったため、実測は不可能となった。

そこで、キャプセル挿入位置と同一位置でニッケルフォイルを照射して中性子束を求めて各試験片位置での高速中性子束を求めた。この実測値と計算値から実際の圧力容器の積算中性子束を算出した。

今回照射後試験を実施したのは、67MRJ-1およびRJ-2であり、各々の照射量は $1 \times 10^{18} \text{m}^{-2}$ ($E > 1 \text{Mev}$), $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-2}$ ($E > 1 \text{Mev}$)である。照射期間と積算中性子束が比例しないのは、照射ラック(IR-12)内の高さ方向の位置が異なり、67MRJ-1は原子炉の中心から離れているためである。1985年4月第68運転サイクルを終えた時点での圧力容器の高速中性子束の最大照射量は $3.2 \times 10^{18} \text{m}^{-2}$ ($E > 1 \text{Mev}$)である。

圧力容器材の照射キャプセルには各々引張試験片、衝撃試験片、水素分析試験片が組込まれているが、今回、衝撃試験は衝撃試験片の予想される吸収エネルギーがJMTRホットラボの持つ最大容量のシャルピー試験機の試験容量とほぼ等しく、全吸収となって試験片が支持台にかみついた場合、単にこのPIEばかりでなく全体の照射後試験に影響が及ぶこと、水素分析試験は照射量が低く適切な分析方法が見つからないこと、により中止し、引張試験と硬度測定のみ実施した。

SUS 304Lの引張試験データを表14に、高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係を図14に、硬さ試験の結果を表15に示す。

図14において、未照射時のデータが記入されていない。これは、未照射試料を保管中に紛失し試験できなかった事によるが、圧力容器の材料試験データを調査したところ、照射した試料と同一条件で製造された容器胴部の試験データと耐力、引張強さ、伸び共に照射による影響とは考えられない大幅な差が存在し、未照射時のデータを合理的理由を持って推定し得るデータが得られなかったためである。

6. あとがき

炉心構造材、圧力容器材のサーベランス試験の目的は、これら要素の健全性を保つための管理計画を作成するために必要なデータを得ることである。

JMTRで、供用期間中に交換することを予定していないものは、原子炉圧力容器と格子板である。圧力容器材のサーベランス試験については、キャプセル2本を継続照射中であり、JMTRの稼動に合わせて照射後試験を行う計画である。格子板については、最近の計算によるとその高速中性子照射量は当初の想定値より低く、今回得られたデータにより今後の供用期間をある程度カバーし得るものと考えられる。

ベリリウム、ハフニウム、17-4 PH, SUS 304 等の中性子反射材、制御材および制御要素構成材は、照射の進んだものは適宜、新しいものと交換して使用するものであり、サーベランス試験から得られたデータは、これら要素の管理計画策定に生かされる。これら要素の管理計画において想定している高速中性子照射量は、いずれも $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$) であり、今回得られたデータの中で17-4 PH, SUS 304 の照射量が計画より相当低かったといえる。

ベリリウムに関しては、KBI材を納めたキャプセル1本を継続照射中であり、現在 $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$) に達している。このキャプセルは $1.2 \sim 1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ で照射後試験を予定している。

照射損傷、変形等は、JMTRの稼動率と密接な関係にある。

運転開始以来、JMTRの運転サイクルは年平均4サイクルであり(22日/サイクルとして)、稼動率は25%程である。

現在、JMTRでは、高稼動率、照射のじん速化をめざして検討が進められている。稼動率の向上は、向上した割合だけ中性子照射量が増し照射損傷、変形を増加させる。また稼動率向上のためには、長期の炉停止を必要とする炉心構造物等の交換を少なくする必要も生ずる。

例えば、ベリリウム枠の使用限界を $28,000 \text{ MW} \cdot \text{d}$ ($1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ $E > 1 \text{ Mev}$) とすると4サイクル/年の運転では7年周期の交換となるが、7サイクル/年に稼動率が向上すると4年周期の交換となり、稼動率70%では2.5年毎に交換することとなる。

稼動率の向上は、炉心要素・構造物交換のための長期炉停止を要求するという矛盾した事態も予想され、稼動率の向上を目指すには、炉心要素管理計画の改訂の可能性を追求するために更に高い照射量を目標とした試験が必要となる。

サーベランス試験計画が立案されて以来10数年を経て、一部を除いて無事計画を終了し、一応の目的を遂げた。

サーベランス試験計画を終るにあたって、以下にこの計画における問題点、反省点を列挙する。

1. 炉心要素管理計画作成に必要な照射量に達しない材料がある。

2. 使用限界と想定される照射量近傍のデータが不足している。キャプセル数、試料数が厳しく制限されているのであるから、使用限界と考えられる照射量近傍のデータを重点的に収集すべきであった。
3. ベリリウム以外の末照射試料を紛失してしまい一貫したデータの評価が不可能になった。
4. 照射量を測定するフラックスモニタワイヤの設計が不適切であったため、炉心構造材のモニタワイヤは放射能が高すぎ、逆に圧力容器材のモニタワイヤは低すぎていずれも測定できず、計算に依らざるを得なかった。
5. 照射後試験を実施するJMTRホットラボトリーの材料試験セルの能力を超える放射エネルギーの試料が生じ、10数年間照射した試料を廃棄せざるを得なかった。H.Lの能力を考慮した試料、試料を考慮したH.Lが必要である。
6. 高nvtを短期間で得る必要がある。これは、このサーベランス計画特有の問題では無いが、材料試験炉で現在 $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$)の照射量を得るのに約7年*を要する。当サーベランス計画で $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ を目標としたキャプセルは、ピーク照射量が $1.2 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ (平均 $0.9 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$)に達するのに10年半を要している。これは炉心構成の都合上、一時期炉心外側の中性子束の低い位置に配置されたからであるが、炉心要素の管理、計画作成上は、現状の半分程度の期間でデータが得られることが望まれる。
7. 材料試験炉の炉心構造材には、ベリリウムやハフニウムの如く、照射によって延性が極端に低下するものがあるが、67M43 J, 67M44 J-1, 2, 3キャプセルの引張試験では伸び計を使用しなかったため、伸びの評価が不可能となった。
 また、ベリリウム材の衝撃吸収エネルギーは末照射材の 5.56 mm^2 の試験片で 0.2 J 、 $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ の試験片で 1 J 程度であるが、上述のキャプセルに装荷されていた試験片を 294 J の容量を持った試験機で試験を行ったため、試験機の持つフリクション等に隠れてしまい、この方法で行った全てのデータが無効となった。試験機等試験条件を慎重に吟味すべきであった。他にハフニウムの衝撃試験データにも試験機等、試験条件が不適切だったのではないと思われるものがある。
8. 燃焼度測定のためのハフニウムの化学分析 (Ta, Luの分析 — できれば、厚さ方向の距離をパラメータにして)、衝撃試験片を利用した硬度測定、水素分析等が計画段階で企画されながらも、照射後試験担当部門に正式に伝達されていなかったり、分析試験の方法が見つからなかったり、実行できなかったのは残念であった。

*年間4運転サイクル, $1080 \text{ MW} \cdot \text{d}/\text{サイクル}$, $\phi_f = 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}$ $E > 1 \text{ Mev}$ と仮定して

9. 試験片の寸法変化を測定できるよう、末照射試料の代表的長さ方向の寸法をミクロンオーダーで測定しておくべきであった。(特にベリリウムとハフニウム)この測定値がないため、材料試験炉の炉心要素管理計画を立案するにあたっては、反射体要素の曲げ変形量を測定し、照射量と変形量に関連づけるモデルを立ててスエリング量を求めているが、精度の点で直接測定することが望ましい。

ベリリウムの衝撃試験片については、その重量を精密測定してあったため、腐食による質量の増減量を測定することができた。

サーベランステストは、企画してから実際に照射後試験データを入手するまでには相当長期間を要する。当初、不必要と考えられたデータでもその後の変遷によって、極めて有用なデータとなることも有り得る事を考慮すべきである。

10. 照射中の試験片温度を測定すべきであった。特にハフニウムは γ 発熱量が大きく、粗い計算によっても相当の照射温度に達する。キャプセル内部の構造が複雑なため、流速が特定できず計算精度が出ない。実測すべきであった。

11. 使用済の炉心構造物から試験片を切り出して照射後試験を行なえるようにすべきである。

ハフニウムなどは、熱中性子吸収断面積が大きいため、試験片の形状、数量とも炉心への装荷量は制限を受けざる得ず、十分なデータが得られない。

SHIPPINGポート、ATRにおいても実際に使用した吸収体から試料を得て試験を行っており、この方法は、当初計画されていなかった試験でも、その後の技術進歩によって必要となったような試験にも対応でき都合である。

ベリリウムの引張試験においても、直接引張試験の困難な高照射量の領域で曲げ試験等を行え有利である。

12. 照射キャプセル内の小キャプセルを入替え可能な構造とすべきである。これによって小キャプセル毎の照射量を平均化でき、照射期間は長くなるが少ないキャプセル数で有意なデータが得られる。

最後に、上述の如き問題を生じた最大の理由は、サーベランス計画の位置づけにあると考える。計画の遂行は長期にわたるため担当者の交替等にあたっては十分な引継が必要である。

この報告書は、JMTRにおけるサーベランス試験計画の現時点での最終報告書で、1974年12月に“JMTR炉心構造物のサーベランステスト(照射後試験結果)、JAERI-M 5963”にまとめられた中間報告にかわるものである。

十数年に渡ったサーベランステストは、数多くの人々の協力のもとで遂行された。

本報告書に記載したデータのうち目標高速中性子照射量 $5 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ までのものは、現原子炉安全工学部保証措置技術研究室、市橋芳徳室長がまとめられたものを使用した。

照射後試験を担当された JMTR H.L は、特殊な材料であるが故の多くの困難にもかかわらず、特殊治具を設計・製作して試験を遂行された。

高温試験技術室、深谷 清氏には電頭による写真観察をお願いした。
ここに謝意を表します。

参考文献

1. WAPD-TM-336
The properties of Hafnium from a PWR control rod after one seed life exposure.
2. WAPD-TM-337
Properties of a Hafnium control rod after exposure during two seed lives in PWR core 1.
3. IN-1036
ETR Radiation damage surveillance programs progress report II
H.D. Gronbeck
4. Surveillance testing and property evaluation of beryllium in test reactors.
J.M. Beeston 他 Aerojet Nuclear company Idaho.
5. Hafnium control rod behavior in the shippingport pressurized water reactor
G.J. Salvaggio, Nuclear Applications VOL. 5 July, 1968.
6. Postirradiation examination and performance of Hafnium as a control rod material
J.M. Beeston, EG & G Idaho
Transaction of the American nuclear society.

試験結果一覧表

材 料	試 験 項 目	試 験 結 果	
		表	図
ベリリウム	引 張 試 験	3・1～3・6	3, 4
	衝 撃 試 験	4・1～4・3	5
	質 量 測 定	5	6
	応 力 - 歪 線 図		7, 8
	電 顕 写 真 観 察	6	付録C-1～C-3
ハフニウム	引 張 試 験	8	9
	衝 撃 試 験	9	10
17-4 P H	引 張 試 験	11	11
	衝 撃 試 験	12	12
S U S 304	引 張 試 験	13	13
S U S 304 L	引 張 試 験	14	14
	硬 さ 試 験	15	

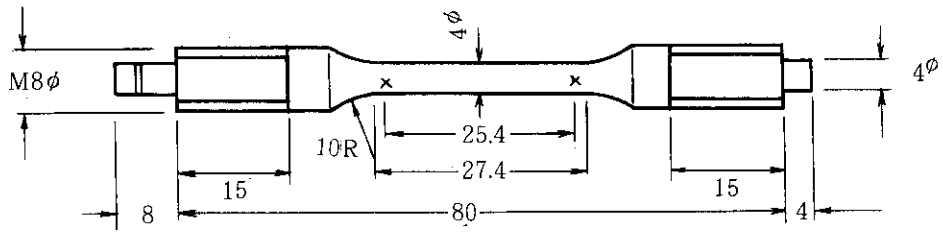
表1 ベリリウム材の化学成分

Maker & LOT No Element	N G K			K B I		BRUSH	仕 様
	Lot No 13	Lot No 23	Lot No 32	Lot No 628	Lot No 715	Lot No 2318	
Be (%)	98.65	98.46	98.42	98.65	98.65	99.0	> 98.0
BeO (%)	1.09	1.31	1.31	1.58	1.57	1.7	< 2.0
Al (ppm)	320	120	560	240	300	380	< 1,000
B (ppm)	< 2	< 2	< 2	< 1	< 1	3	< 5
Cd (ppm)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 2	< 2
Ca (ppm)	-	-	-	< 200	< 200	< 85	< 200
C (ppm)	660	530	750	650	650	1,400	< 1,500
Cr (ppm)	50	50	40	100	80	75	< 200
Co (ppm)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	9	< 10
Cu (ppm)	70	80	90	< 50	50	50	< 150
Fe (ppm)	780	640	560	1,230	1,220	730	< 1,600
Pb (ppm)	< 5	< 5	< 5	10	< 1	< 6	< 20
Li (ppm)	< 1	1.3	< 1.4	< 1	< 1	< 3	< 3
Mg (ppm)	30	20	40	30	30	260	< 500
Mn (ppm)	60	70	60	80	80	45	< 150
Ni (ppm)	80	80	100	170	220	100	< 300
Mo (ppm)	< 8	< 8	< 8	< 10	< 10	10	< 20
Si (ppm)	280	230	190	260	260	300	< 800
Ag (ppm)	5	7	3	< 1	< 1	< 3	< 10
Cl (ppm)	16	14	12	< 50	< 50	< 25	< 400
N (ppm)	220	430	230	200	160	242	< 500
Dy, Eu, Sm, Gd (ppm)	-	-	-	< 1.4	1.4	< 2	< 10

成分は重量%およびppmで表わす。

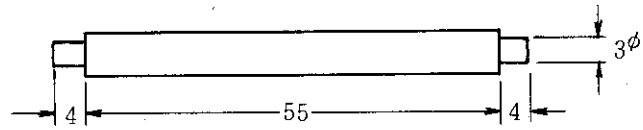
Be 引張試験片

単位はmm

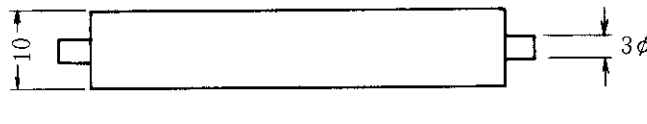


Be 衝撃試験片

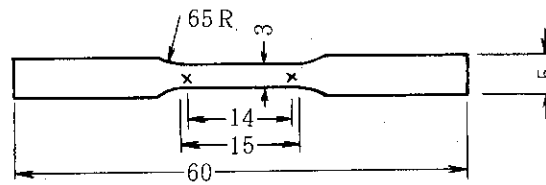
(1)



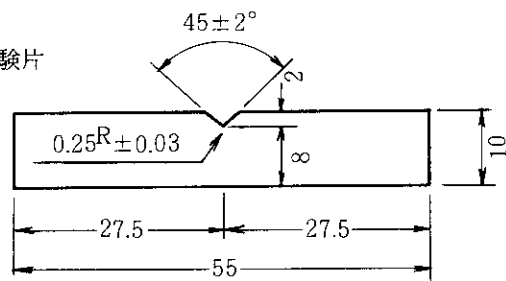
(2)



Hf 引張試験片



Hf, 17-4PH, 304L ステンレス 衝撃試験片

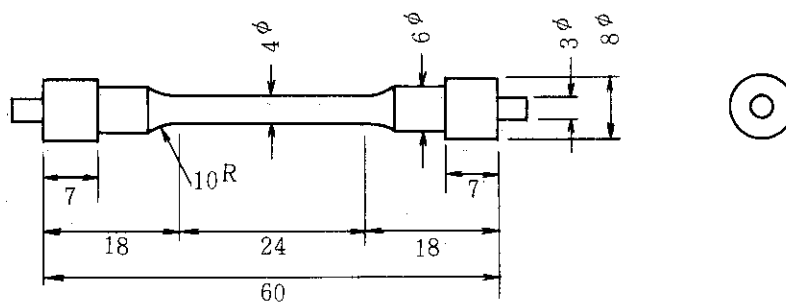


厚さ $t = 5$ Hf, 17-4PH

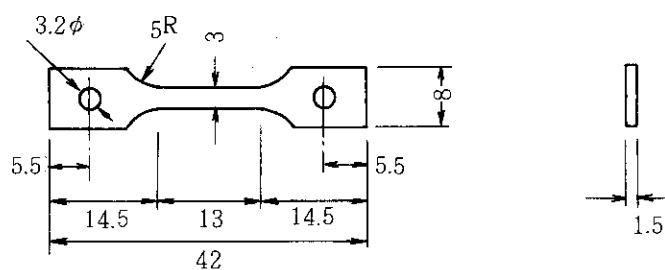
$t = 10$ 304L ステンレス

図1 テストピースの形状

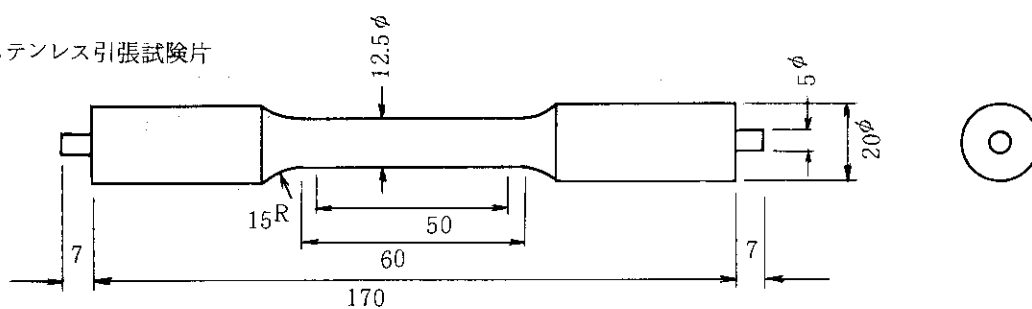
17-4PH 引張試験片



304 ステンレス 引張試験片



304L ステンレス 引張試験片



304L ステンレス 水素分析試験片

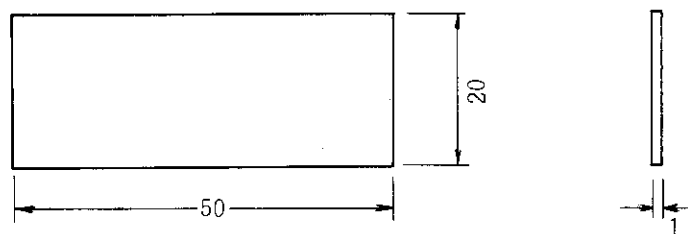


図1 テストピースの形状 (続)

表2 照射キャプセルおよび試験片一覧

材料	試験種別	キャプセル番号	小キャプセル番号	試験片番号	高速中性子照射量(m^{-2})
Be	衝撃	67M43 J	BC- 1	G1, G2, G3, G4, G5	1.1×10^{24}
			BC- 2	H1, H2, H3, I1, I2	1.5×10^{24}
			BC- 3	I3, J1, J2, J3, K1	1.9×10^{24}
			BC- 4	K2, K3, L1, L2, L3	2.2×10^{24}
		67M44 J- 1	BC- 5	L4, H4, H5, H6, H7	3.1×10^{24}
			BC- 6	J4, J5, J6, L5, L6	3.6×10^{24}
		67M44 J- 2	BC- 7	H8, H9, H10, H11, L7	6.1×10^{24}
			BC- 8	J7, J8, J9, L8, L9	7.2×10^{24}
		67M44 J- 3	BC- 9	H12, H13, H14, H15, L10	4.6×10^{25}
			BC- 10	J10, J11, J12, L11, L12	5.4×10^{25}
		67M44 J- 4	BC- 11	H16, H17, H18, H19, L13	9.0×10^{25}
			BC- 12	J13, J14, J15, L14, L15	1.1×10^{26}
		76M- 9 J	BC- 13	L31, L32, L33, L34	0.7×10^{24}
			BC- 14	T31, T32, T33, T34	1.2×10^{24}
			BC- 15	L35, L36, L37, L38	2.7×10^{24}
			BC- 16	T35, T36, T37, T38	3.5×10^{24}
			BC- 17	L39, L40, L41, L42	3.3×10^{24}
			BC- 18	T39, T40, T41, T42	1.7×10^{24}
	74M51 J	BC- 1	L7, L8, L9, L10	1.0×10^{25}	
		BC- 2	T7, T8, T9, T10	1.7×10^{25}	
		BC- 3	L11, L12, L13, L14	3.5×10^{25}	
		BC- 4	T11, T12, T13, T14	4.8×10^{25}	
		BC- 5	L15, L16, L17, L18	4.4×10^{25}	
		BC- 6	T15, T16, T17, T18	2.4×10^{25}	
	74M52 J	BC- 7	L19, L20, L21, L22	照射中	
		BC- 8	T19, T20, T21, T22	"	
		BC- 9	L23, L24, L25, L26	"	
		BC- 10	T23, T24, T25, T26	"	
		BC- 11	L27, L28, L29, L30	"	
		BC- 12	T27, T28, T29, T30	"	
	引張	67M43 J	BP- 1	A1, A2, A3, A4, F1, F2	2.4×10^{24}
			BP- 2	B1, B2, B3, C1, C2, C3	2.4×10^{24}
			BP- 3	D1, D2, D3, E1, E2, E3	1.9×10^{24}
			BP- 4	B4, B5, B6, C4, C5, F3	1.3×10^{24}
		67M44 J- 1	BP- 5	D4, D5, D6, E4, E5, F4	2.3×10^{24}
		67M44 J- 2	BP- 6	B7, B8, D7, D8, F5, F6	4.5×10^{24}
67M44 J- 3		BP- 7	B9, B10, D9, D10, F7, F8	3.5×10^{25}	
67M44 J- 4		BP- 8	F9, F10, D11, D12, B11, B12	6.6×10^{25}	
76M 9 J		BP- 9	L31, L32, L33, L34, L35, L36	2.0×10^{24}	
		BP- 10	T31, T32, T33, T34, T35, T36	3.2×10^{24}	
		BP- 11	L37, L38, L39, L40, L41, L42	3.6×10^{24}	
		BP- 12	T37, T38.	2.6×10^{24}	

表2 照射キャプセル及び試験片一覧(続)

材料	試験種別	キャプセル番号	小キャプセル番号	試験片番号	高速中性子照射量(m^{-2})
Be	引張	74M51 J	BP-1	L7, L8, L9, L10, L11, L12,	2.6×10^{25}
			BP-2	T7, T8, T9, T10, T11, T12,	4.3×10^{25}
			BP-3	L13, L14, L15, L16, L17, L18,	4.8×10^{25}
			BP-4	T13, T14, T15, T16, T17, T18,	3.5×10^{25}
		74M52 J	BP-5	L19, L20, L21, L22, L23, L24,	照射中
			BP-6	T19, T20, T21, T22, T23, T24,	"
			BP-7	L25, L26, L27, L28, L29, L30,	"
			BP-8	T25, T26, T27, T28, T29, T30,	"
17-4PH	衝撃	67M44 J-1	PC-1	P1, P2	3.0×10^{24}
			PC-2	P3, P4	2.0×10^{24}
		67M44 J-2	PC-3	P5, P6	6.0×10^{24}
			PC-4	P7, P8	4.0×10^{24}
		67M44 J-3	PC-5	P9, P10	4.5×10^{25}
			PC-6	P11, P12	3.0×10^{25}
		67M44 J-4	PC-7	P13, P14	8.8×10^{25}
			PC-8	P15, P16	6.0×10^{25}
	引張	67M44 J-1	P-1	P1, P2	0.9×10^{24}
		67M44 J-2	P-2	P3, P4	1.7×10^{24}
		67M44 J-3	P-3	P5, P6	1.4×10^{25}
		67M44 J-4	P-4	P7, P8	2.6×10^{25}
Hf	衝撃	67M44 J-1	HC-1	H-1, H-2	4.0×10^{24}
			HC-2	H-3	4.0×10^{24}
		67M44 J-2	HC-3	H-4, H-5	6.9×10^{24}
			HC-4	H-6	7.9×10^{24}
		67M44 J-3	HC-5	H-7, H-8	8.0×10^{25}
			HC-6	H-9	6.1×10^{25}
		67M44 J-4	HC-7	H-10, H-11	1.2×10^{26}
			HC-8	H-12	1.2×10^{26}
	引張	67M44 J-1	HP-1	H-1, H-2, H-3	3.7×10^{24}
		67M44 J-2	HP-2	H-4, H-5, H-6	7.4×10^{24}
		67M44 J-3	HP-3	H-7, H-8, H-9	5.6×10^{25}
		67M44 J-4	HP-4	H-10, H-11, H-12	1.1×10^{26}
SUS 304	引張	67M44 J-1	G-1	G-1, G-2, G-3	1.6×10^{24}
		67M44 J-2	G-2	G-4, G-5, G-6	3.0×10^{24}
		67M44 J-3	G-3	G-7, G-8, G-9	2.3×10^{25}
		67M44 J-4	G-4	G-10, G-11, G-12	4.4×10^{25}

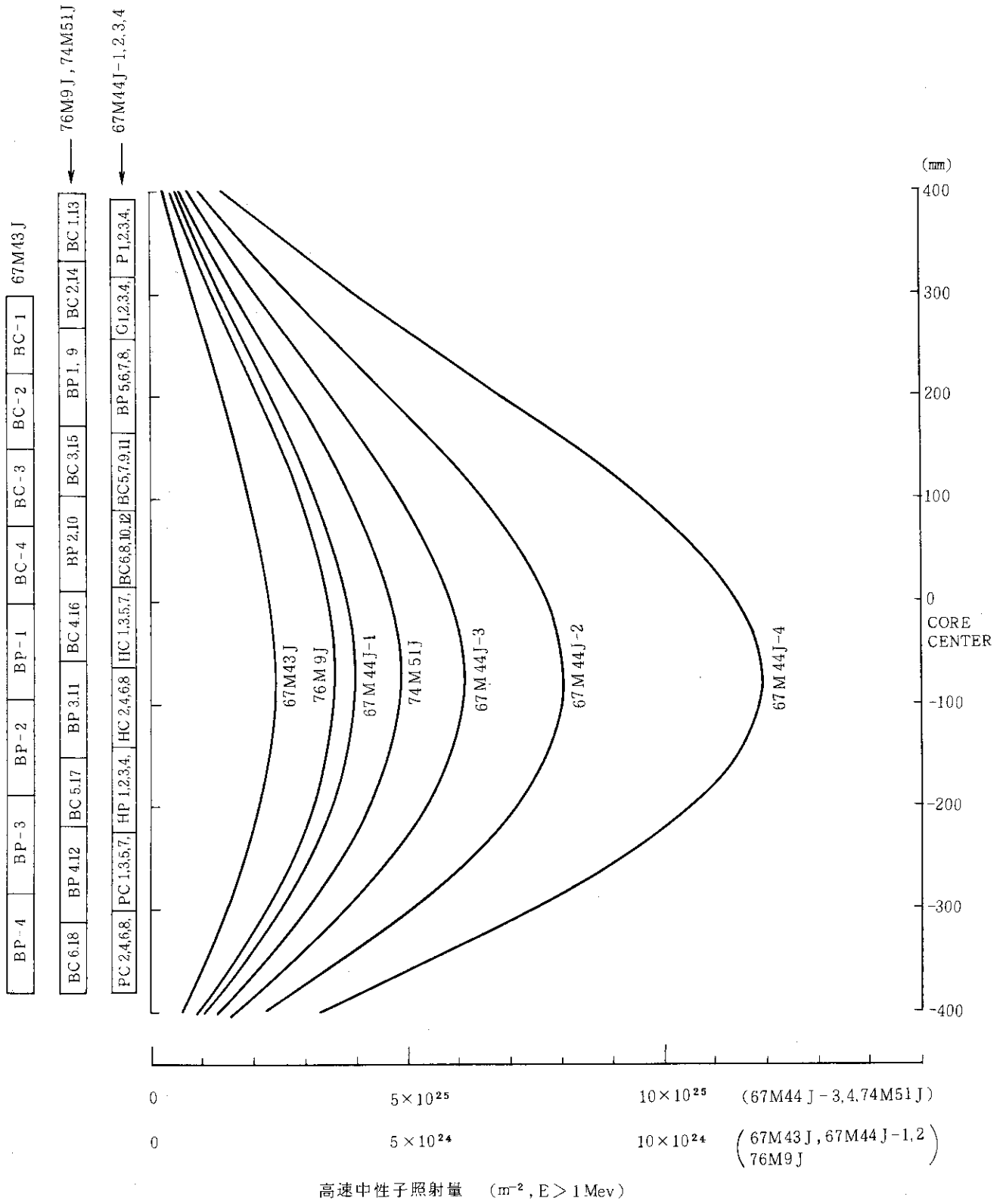


図2 小キャプセルの位置と高速中性子照射量の関係

表3.1 ベリリウム引張試験データ (NGK)

試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備 考
L-1	0	R.T	417.5	234.2		9.2			引張試験機 (1)使用
L-2	0	R.T	468.4	242.1		10.6			
L-3	0	R.T	434.1	244.0		9.8			
T-1	0	R.T	320.5						
T-2	0	R.T	363.6			2.4			
T-3	0	R.T	324.4						
TT-1	0	R.T	303.8						
TT-2	0	R.T	303.8						
TT-3	0	R.T	301.8						
TT-7	0	R.T	281.3			0.8			
BP1-	2.4×10^{24}	22	503.7	447.9		0.18		B	引張試験機
BP1-	"	22	394.0	388.1		0.06		A	(2)使用
BP1-	"	23	509.6	447.9		0.20		A	
BP1-	"	23	407.7	367.5		0.12		C	
BP1-	"	23	524.3	447.9		0.25		C	
BP1-	2.4×10^{24}	23	492.9	450.8		0.14		B	
BP2-	2.4×10^{24}	23	414.5	414.5		0.04		B	ネジ部破断・再試験
BP2-	"	23	398.9	377.3		0.09		A	
BP2-	"	23	435.1	425.3		0.07		B	
BP2-	"	23	403.8	394.9		0.07		B	
BP2-	"	20	402.8	400.8		0.05		A	
BP2-	2.4×10^{24}	20	453.7	418.5		0.15		A	
BP3-	1.9×10^{24}	20.5	391.0	365.5		0.05		A	
BP3-	"	20.5	435.1	372.4		0.24		B	
BP3-	"	20.5	383.2	369.5		0.08		A	
BP3-	"	20.5	419.4	375.3		0.16		C	
BP3-	"	20.5	444.9	373.4		0.30		B	
BP3-	1.9×10^{24}	20.5	387.1	356.7		0.13		C	
BP4-	1.3×10^{24}	20.5	393.0	375.3		0.10		C	
BP4-	"	20.5	445.9	375.3		0.27		B	

表 3.2 ベリリウム引張試験データ (NGK) —続—

試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備 考
BP4-	1.3×10^{24}	20.5	361.6	356.7		0.07		C	引張試験機, ネジ部破断
BP4-	"	19	429.2	356.7		0.17		B	(2)使用 再試験
BP4-	"	19	383.2	336.1		0.16		C	"
BP4-	"	19	374.4	339.1		0.15		B	"
BP5-	2.3×10^{24}	19	388.1	371.4		0.08		B	" BP-5試験中2本破損
BP5-	"	19				0.13		C	"
BP5-	"	19	457.7	394.9		0.25		A	"
BP5-	"	19	393.0	393.0		0.04		A	"
BP7-	3.5×10^{25}	17	572.3	572.3		0.0		A	" ネジ部破損再試験
BP7-	"	17	430.2	430.2		0.0		B	"
BP7-	"	17	394.9	394.9		0.0		C	"
BP7-	"	17							" 破損
BP7-	"	17	466.5	466.5		0.0		C	"
BP7-	"	17							" 破損
BP8-F9	6.6×10^{25}	21	265.6	265.6		0.0		C	" 伸び計使用
BP8-F10	"	21	325.4	325.4		0.0		A	"
BP8-D11	"	21	251.9	251.9		0.0		C	"
BP8-D12	"	21	306.7	306.7		0.0		B	"
BP8-B11	"	21	271.5	271.5		0.0		C	"
BP8-B12	"	21	322.4	322.4		0.0		A	"

NOTE: BP-6は小キャプセル解体時, 全て破損

表 3.3 ベリリウム引張試験データ (KBI) 一統一

試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1 \text{ MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備 考
1LT	0	R. T	321.4	224.4		2.28			LOT No.628T
2LT	"	"	326.3	231.3		2.18			"
3LT	"	"	322.4	226.4		2.00			"
4LT	"	"	324.4	226.4		2.23			"
5LT	"	"	321.4	224.4		2.00			"
1TT	"	"	368.5	246.0		4.08			"
2TT	"	"	359.7	235.2		3.68			"
3TT	"	"	353.8	230.3		3.93			"
4TT	"	"	360.6	233.2		3.88			"
5TT	"	"	353.8	238.1		3.18			"
1LB	"	"	314.6	228.3		1.58			"
2LB	"	"	313.6	229.3		1.55			"
3LB	"	"	316.5	230.3		1.63			"
4LB	"	"	319.5	229.3		1.63			"
5LB	"	"	317.5	229.3		1.40			"
1TB	"	"	367.5	245.0		3.98			"
2TB	"	"	354.8	229.3		4.13			"
3TB	"	"	346.9	227.4		3.73			"
4TB	"	"	355.7	232.3		3.35			"
5TB	"	"	357.7	233.2		3.10			"

表 3.4 ベリリウム引張試験データ (KBI) — 続 —

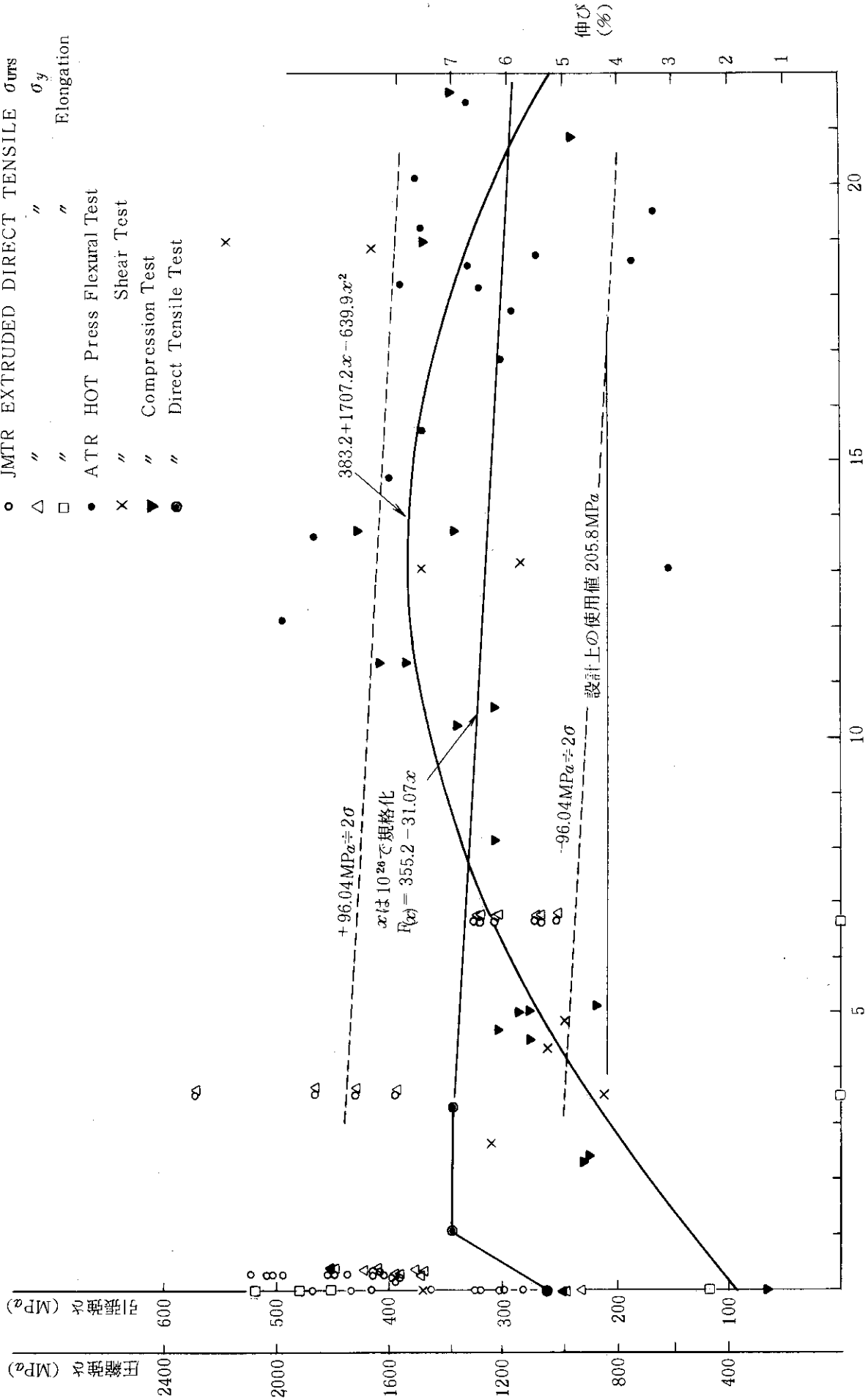
試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備	考
1LT	0	R, T	334.2	232.3		2.0			LOT No. 715T	
2LT	"	"	339.1	236.2		2.4			"	
3LT	"	"	340.1	234.2		2.5			"	
4LT	"	"	336.1	234.2		2.2			"	
5LT	"	"	337.1	233.2		2.4			"	
1TT	"	"	351.8	222.5		4.4			"	
2TT	"	"	370.4	246.0		3.6			"	
3TT	"	"	369.5	244.0		4.0			"	
4TT	"	"	371.4	246.0		3.6			"	
5TT	"	"	353.8	228.3		3.8			"	
1LB	"	"	380.2	264.6		2.8			"	
2LB	"	"	378.3	266.6		2.7			"	
3LB	"	"	367.5	254.8		2.6			"	
4LB	"	"	361.6	246.0		2.6			"	
5LB	"	"	375.3	258.7		2.8			"	
1TB	"	"	387.1	259.7		4.2			"	
2TB	"	"	387.1	263.6		4.0			"	
3TB	"	"	395.9	270.5		4.5			"	
4TB	"	"	390.0	264.6		3.9			"	
5TB	"	"	385.1	251.9		4.5			"	
BP1-L7	2.6×10^{25}	21	300.9	300.9		0.0		C		
BP1-L8	"	"	309.7	309.7		0.0		C		
BP1-L9	"	"	309.7	309.7		0.0		C		
BP1-L10	"	"	279.3	279.3		0.0		A		
BP1-L11	"	"	351.8	351.8		0.0		C		
BP1-L12	"	"	305.8	305.8		0.0		C		
BP2-T7	4.3×10^{25}	"	256.8	256.8		0.0		C		
BP2-T8	"	"	285.2	285.2		0.0		C		
BP2-T9	"	"	248.9	248.9		0.0		B		
BP2-T10	"	"	285.2	285.2		0.0		A		

表 3.5 ベリリウム引張試験データ (KBI) - 続 -

試験片	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備 考
BP2-T11	4.3×10^{25}	21	219.5	219.5		0.0		B	
BP2-T12	"	"	255.8	255.8		0.0		B	
BP3-L13	4.8×10^{25}	"	189.1	189.1		0.0		C	
BP3-L14	"	"	276.4	276.4		0.0		C	
BP3-L15	"	"	225.4	225.4		0.0		B	
BP3-L16	"	"	218.5	218.5		0.0		C	
BP3-L17	"	"	222.5	222.5		0.0		C	
BP3-L18	"	"	334.2	334.2		0.0		C	
BP4-T13	3.5×10^{25}	"	183.3	183.3		0.0		C	
BP4-T14	"	"	161.7	161.7		0.0		C	
BP4-T15	"	"	222.5	222.5		0.0		A	
BP4-T16	"	"	237.2	236.2		0.0		C	
BP4-T17	"	"	212.7	212.7		0.0		A	
BP4-T18	"	"	248.9	248.9		0.0		C	
BP9-L31	2.0×10^{24}	"	465.5	465.5		0.12		C	
BP9-L32	"	"	456.7	456.7		0.06		C	
BP9-L33	"	"	471.4	471.4		0.10		A	
BP9-L34	"	"	475.3	475.3		0.12		C	
BP9-L35	"	"	462.6	462.6		0.10		B	
BP9-L36	"	"	438.1	438.1		0.07		B	
BP10-T31	3.2×10^{24}	"	540.0	540.0		0.04		C	
BP10-T32	"	"	539.0	539.0		0.05		C	
BP10-T33	"	"	524.3	524.3		0.03		B	
BP10-T34	"	"	530.2	530.2		0.02		B	
BP10-T35	"	"	551.7	551.7		0.04		C	
BP10-T36	"	"	510.6	510.6		0.02		A	
BP11-L37	3.6×10^{24}	"	455.7	455.7		0.004		C	
BP11-L38	"	"	424.3	424.3		0.0		A	
BP11-L39	"	"	501.8	501.8		0.004		C	
BP11-L40	"	"	466.5	466.5		0.004		C	

表 3.6 ベリリウム引張試験データ (KBI) — 続 —

試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備 考
BP11-L41	3.6×10^{24}	21	451.8	451.8		0.0		B	
BP11-L42	"	"	442.0	442.0		0.0		A	
BP12-T37	2.6×10^{24}	"	530.2	530.2		0.05		B	
BP12-T38	"	"	507.6	507.6		0.02		A	
BP12-T39	"	"	540.0	540.0		0.06		B	
BP12-T40	"	"	501.8	501.8		0.02		C	
BP12-T41	"	"	496.9	496.9		0.02		C	
BP12-T42	"	"	475.3	475.3		0.01		B	



高速中性子照射量 $\times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$)

図3 ベリウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係 (NGK材)

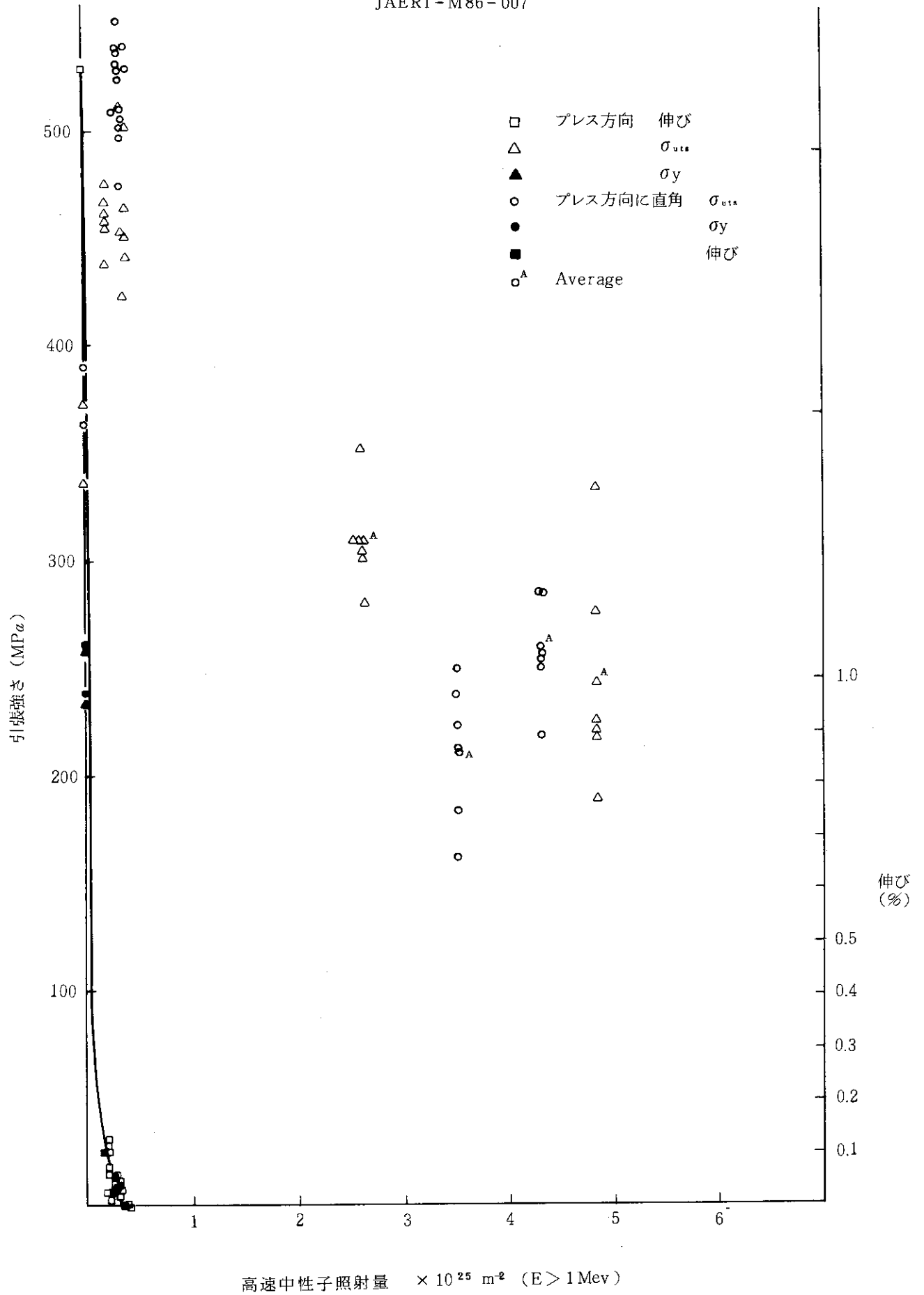


図4 ベリリウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係 (KBI材)

表4.1 ベリリウム衝撃試験データ (NGK)

試験片 No	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ハンマー 持上角度	ハンマー 振上角度	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (10^3 J/m^2)	試験機容量 (J)	断面積 (m^{-4})	備	考
L-5	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.21	6.86	2.94			
L-7	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.21	6.86	"			
L-8	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.24	7.94	"			
T-1	0	R. T	100 $^{\circ}$		0.20	6.66	"			
T-2	0	R. T	100 $^{\circ}$		0.18	5.78	"			
T-3	0	R. T	100 $^{\circ}$		0.20	6.66	"			
T-4	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.21	6.96	"			
T-5	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.18	5.78	"			
T-6	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.21	6.86	"			
T1	0	R. T	100 $^{\circ}$		0.28	8.82	"			
T2	0	R. T	100 $^{\circ}$		0.32	10.19	"			
T3	0	R. T	100 $^{\circ}$		0.31	10.00	"			
T4	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.29	9.31	"			
T5	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.29	9.31	"			
T6	0	R. T	130 $^{\circ}$		0.24	7.94	"			
UNKNOWN	0	R. T	133.8 $^{\circ}$		0.36	11.76	3.92	0.309		
H-16	9.0×10^{25}	R. T	145.0 $^{\circ}$		0.10	3.16	"	0.311		
H-17	"	R. T	144.1 $^{\circ}$		0.12	3.71	"	0.317		
H-18	"	R. T	144.4 $^{\circ}$		0.11	3.56	"	0.311		
H-19	"	R. T	143.9 $^{\circ}$		0.12	3.93	"	0.309		
L-13	"	R. T	145.0 $^{\circ}$		0.10	3.09	"	0.317		
L-14	1.1×10^{26}	R. T	145.4 $^{\circ}$		0.09	2.88	"	0.313		
L-15	"	R. T	146.0 $^{\circ}$		0.08	2.44	"	0.317		
J-13	"	R. T	143.4 $^{\circ}$		0.13	4.25	"	0.311		
J-14	"	R. T	145.0 $^{\circ}$		0.10	3.12	"	0.314		
J-15	"	R. T	140.1 $^{\circ}$		0.21	6.58	"	0.316		

NoTe: L-13, L-14, L-15はBRUSH社製素材を用いている。

表 4.2 ベリリウム衝撃試験データ (KBI) 一統一

試験片 No.	高速中性子 照射量 $\phi > 1\text{Mev}$	試験温度 (°C)	ハンマ一 持上角度	ハンマ一 振上角度	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (10^3 J/m^2)	試験機容量 (J)	断面積 (m^{-4})	備 考
未照射	0	R. T			1.50	30.00	2.94	0.50	
"	0	R. T			1.37	27.44	2.94	0.50	
"	0	R. T	150.0°	125.7°	0.59	11.86	3.92	0.50	
BC1-1	1.0×10^{25}	R. T	"	129.4°	0.49	9.70	"	0.500	
"-2	"	R. T	"	134.8°	0.34	6.76	"	"	
"-3	"	R. T	"	125.0°	0.61	12.29	"	"	
"-4	"	R. T	"	132.9°	0.39	7.78	"	"	
BC2-1	1.7×10^{25}	R. T	"	135.7°	0.32	6.26	"	0.504	
"-2	"	R. T	"	137.8°	0.26	5.21	"	"	
"-3	"	R. T	"	140.4°	0.20	3.97	"	"	
"-4	"	R. T	"	134.4°	0.35	6.92	"	"	
BC3-1	3.5×10^{25}	R. T	"	137.9°	0.26	5.22	"	0.499	
"-2	"	R. T	"	139.4°	0.22	4.98	"	"	
"-3	"	R. T	"	139.8°	0.21	4.30	"	"	
"-4	"	R. T	"	141.4°	0.18	3.56	"	"	
BC4-1	4.8×10^{25}	R. T	"	136.2°	0.30	6.07	"	"	
"-2	"	R. T	"	132.5°	0.40	8.02	"	"	
"-3	"	R. T	"	140.5°	0.20	3.97	"	"	
"-4	"	R. T	"	139.5°	0.22	4.44	"	"	
BC5-1	4.4×10^{25}	R. T	"	140.4°	0.20	4.01	"	"	
"-2	"	R. T	"	140.3°	0.20	4.07	"	"	
"-3	"	R. T	"	141.7°	0.17	3.42	"	"	
"-4	"	R. T	"	119.8°	0.78	15.53	"	"	
BC6-1	2.4×10^{25}	R. T	"	135.5°	0.32	6.45	"	0.497	
"-2	"	R. T	"	138.3°	0.25	5.05	"	"	
"-3	"	R. T	"	140.8°	0.19	3.84	"	"	
"-4	"	R. T	"	137.9°	0.26	5.24	"	"	
BC13-1	0.7×10^{24}	R. T	"	128.5°	0.51	10.23	"	0.499	
"-2	"	R. T	"	128.4°	0.51	10.29	"	"	
"-3	"	R. T	"	126.7°	0.56	11.29	"	"	

表 4.3 ベリリウム衝撃試験データ (KBI) — 続 —

試験片 No	高速中性子 照射量 $E > 1\text{Mev}$	試験温度 (°C)	ハンマ— 持上角度	ハンマ— 振上角度	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (10^3 J/m^2)	試験機容量 (J)	断面積 (m^{-4})	備 考
BC13-4	0.7×10^{24}	R. T	150.0°	131.5°	0.43	8.56	3.92	0.499	
BC14-1	1.2×10^{24}	R. T	"	133.5°	0.37	7.41	"	0.504	
BC14-2	"	R. T	"	127.6°	0.54	10.65	"	"	
BC14-3	"	R. T	"	135.0°	0.33	6.62	"	"	
BC14-4	"	R. T	"	138.2°	0.25	5.02	"	"	
BC15-1	2.7×10^{24}	R. T	"	141.0°	0.19	3.72	"	0.501	
BC15-2	"	R. T	"	130.2°	0.46	9.25	"	"	
BC15-3	"	R. T	"	107.3°	1.19	23.89	"	"	
BC15-4	"	R. T	"	131.2°	0.44	8.70	"	"	
BC16-1	3.5×10^{24}	R. T	"	133.6°	0.37	7.36	"	0.503	
BC16-2	"	R. T	"	136.9°	0.29	5.67	"	"	
BC16-3	"	R. T	"	124.3°	0.64	12.62	"	"	
BC16-4	"	R. T	"	129.1°	0.49	9.82	"	"	
BC17-1	3.3×10^{24}	R. T	"	135.0°	0.33	6.73	"	0.495	
BC17-2	"	R. T	"	137.4°	0.27	5.51	"	"	
BC17-3	"	R. T	"	130.2°	0.46	9.35	"	"	
BC17-4	"	R. T	"	122.8°	0.68	13.76	"	"	
BC18-1	1.7×10^{24}	R. T	"	133.4°	0.38	7.49	"	0.501	
BC18-2	"	R. T	"	132.4°	0.40	8.04	"	"	
BC18-3	"	R. T	"	135.7°	0.32	6.30	"	"	
BC18-4	"	R. T	"	133.9°	0.36	7.24	"	"	

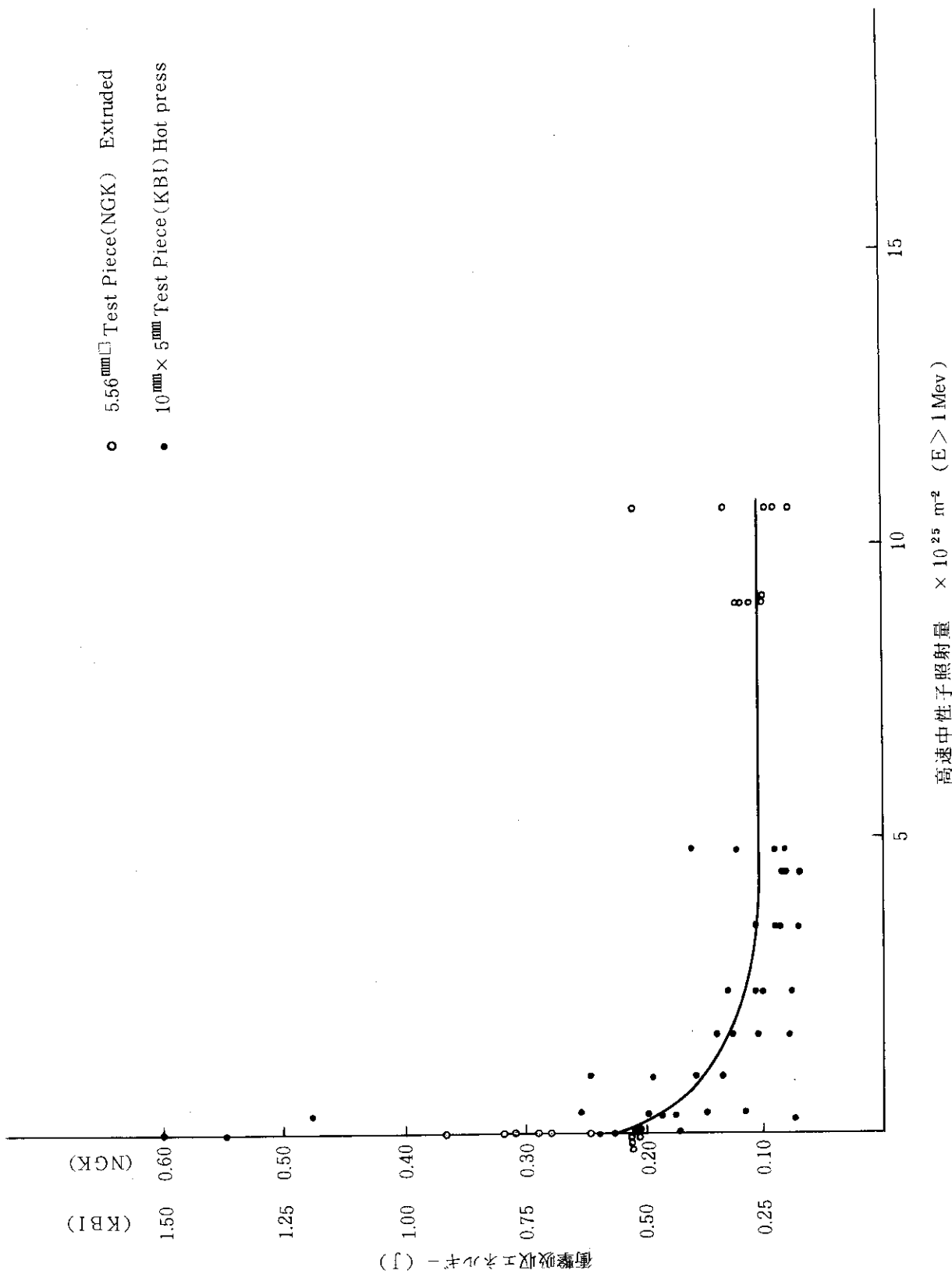


図5 ベリリウムの高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係

表5 Be 衝撃試験片の質量測定

その1

試料番号	照射前質量 ① (gr)	脱クラッド前質量 ② (gr)	脱クラッド後質量 ③ (gr)	全質量変化 ②-① (mg)	クラッド質量 ②-③ (mg)	腐食量 ③-① (mg)	高速中性子 照射量
H-16	3.2650	3.2506	3.2492	-14.4	1.4	-15.8	9.0×10^{25}
H-17	3.2810	3.2680	3.2659	-13.0	2.1	-15.1	"
H-18	3.2605	3.2475	3.2469	-13.0	0.6	-13.6	"
H-19	3.2307	3.2192	3.2177	-11.5	1.5	-13.0	"
L-13	3.3230	3.2978	3.2953	-25.2	2.5	-27.7	"
J-13	3.2000	3.2744	3.2734	74.4	1.0	73.4	1.1×10^{26}
J-14	3.2450	3.1859	3.1850	-59.1	0.9	-60.0	"
J-15	3.3133	3.2303	3.2292	-83.0	1.1	-84.1	"
L-14	3.2392	3.2970	3.2954	57.8	1.6	56.2	"
L-15	3.2882	3.2259	3.2254	-62.3	0.5	-62.8	"

NOTE: L-13, L-14, L-15はBRUSH製素材, 残りはNGK製である。

その2

試料番号	照射前質量 ① (gr)	脱クラッド前質量 ② (gr)	脱クラッド後質量 ③ (gr)	全質量変化 ②-① (mg)	クラッド質量 ②-③ (mg)	腐食量 ③-① (mg)	高速中性子 照射量
H-16	3.2650	3.2506	3.2487	-14.4	1.9	-16.3	9.0×10^{25}
H-17	3.2810	3.2680	3.2644	-13.0	3.6	-16.6	"
L-13	3.3230	3.2978	3.2931	-25.2	4.7	-29.9	"
J-13	3.2000	3.2744	3.2720	74.4	2.4	72.0	1.1×10^{26}
J-14	3.2450	3.1859	3.1844	-59.1	1.5	-60.6	"
L-14	3.2392	3.2970	3.2944	57.8	2.6	55.2	"

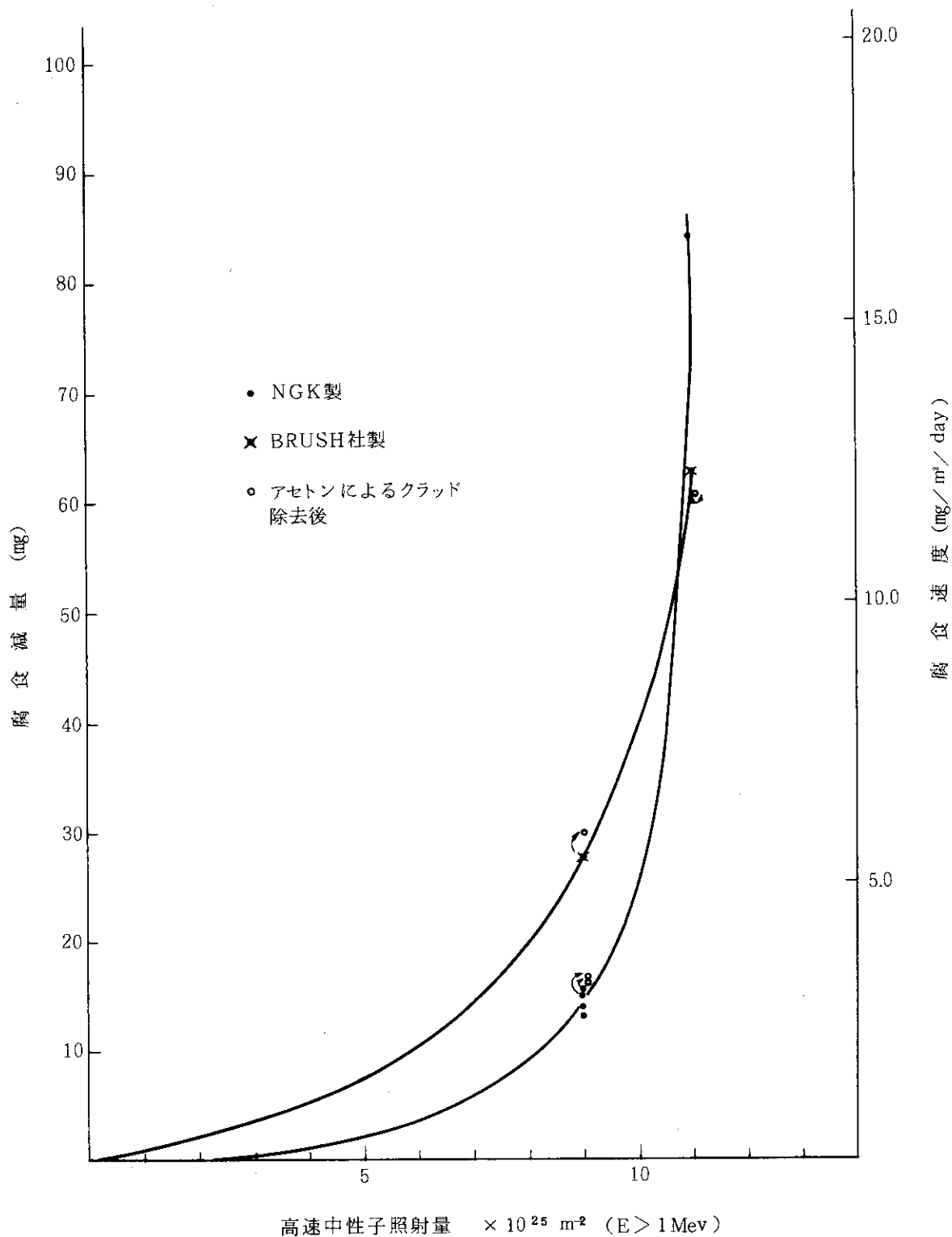


図6 高速中性子照射量と腐食減量の関係

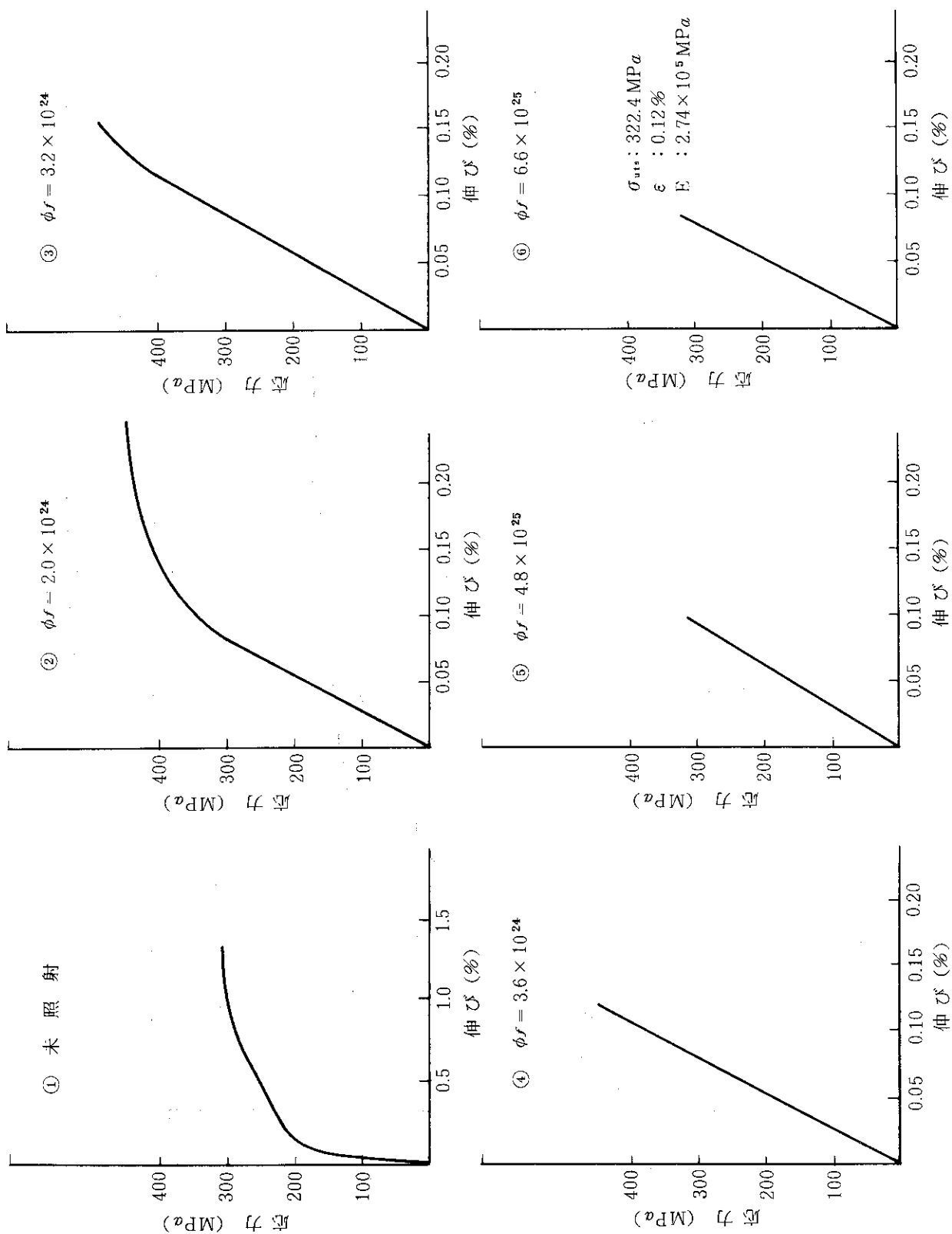


図7 ベリリウムの応力-歪線図 その1

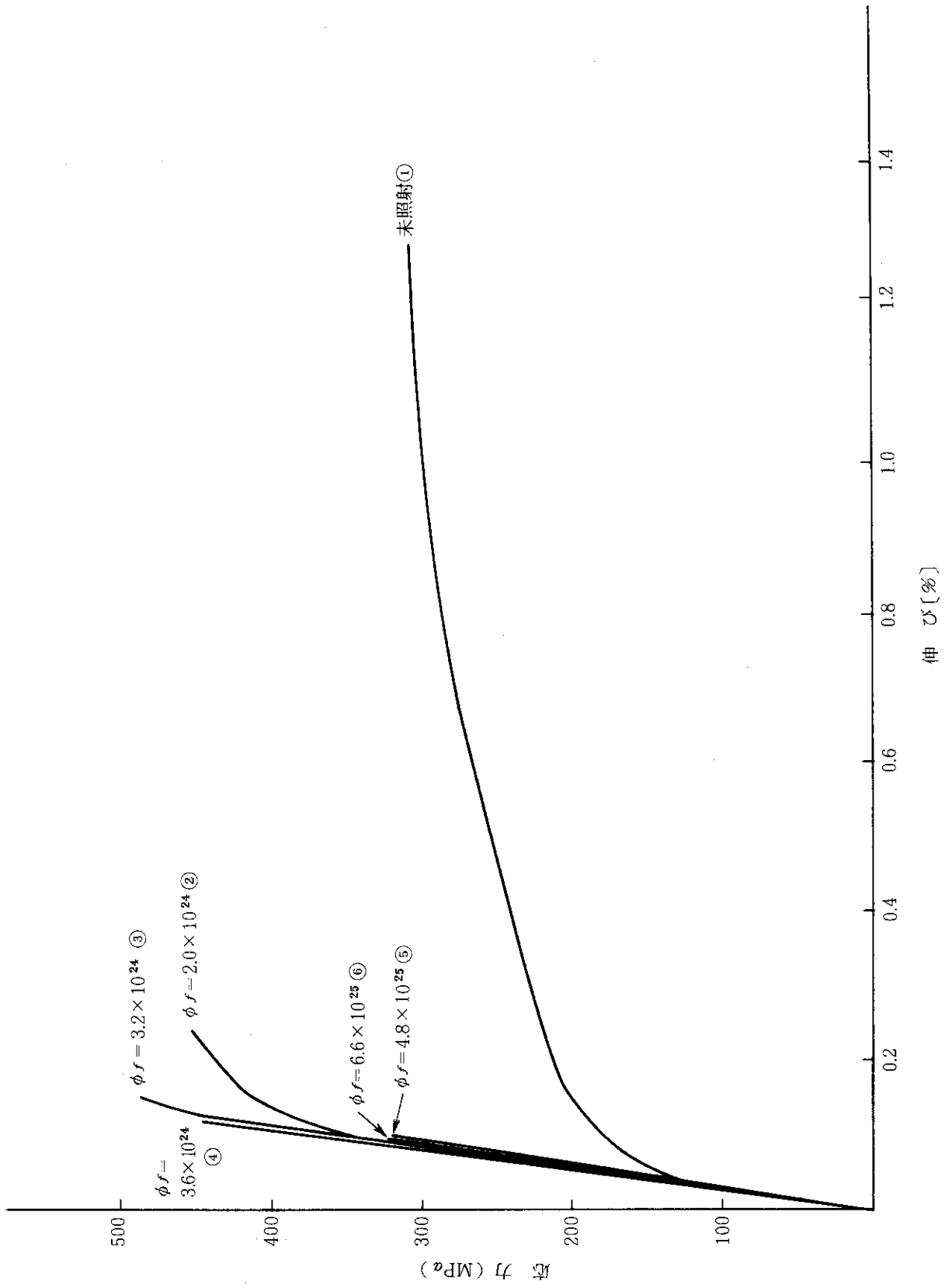


図8 ベリリウムの応力-歪線図 その2

表6 電子顕微鏡観察によるベリリウム中のヘリウム量

試料名 (小キャプセル名)	照射条件 $E > 1 \text{ Mev}$	Anneal 条件	バブル直径 nm	バブル密度 n / cm^3	ヘリウム量
BC-1	炉内位置: J-7-1 $1.1 \times 10^{24} (\text{m}^{-2})$	900°C × 1 Hr	12.0	3.4×10^{13}	5.2×10^{18}
		600°C × 1 Hr	6.0 (粒内)	4.5×10^{15}	1.5×10^{20}
BC-9	炉内位置: H-7-1 $4.6 \times 10^{25} (\text{m}^{-2})$		700°C × 1 Hr	11.5 (粒界)	2.3×10^{15}
		700°C × 1 Hr	21.0 (粒内)	8.3×10^{14}	3.0×10^{20}
			34.0 (粒界)	7.8×10^{14}	1.4×10^{21}

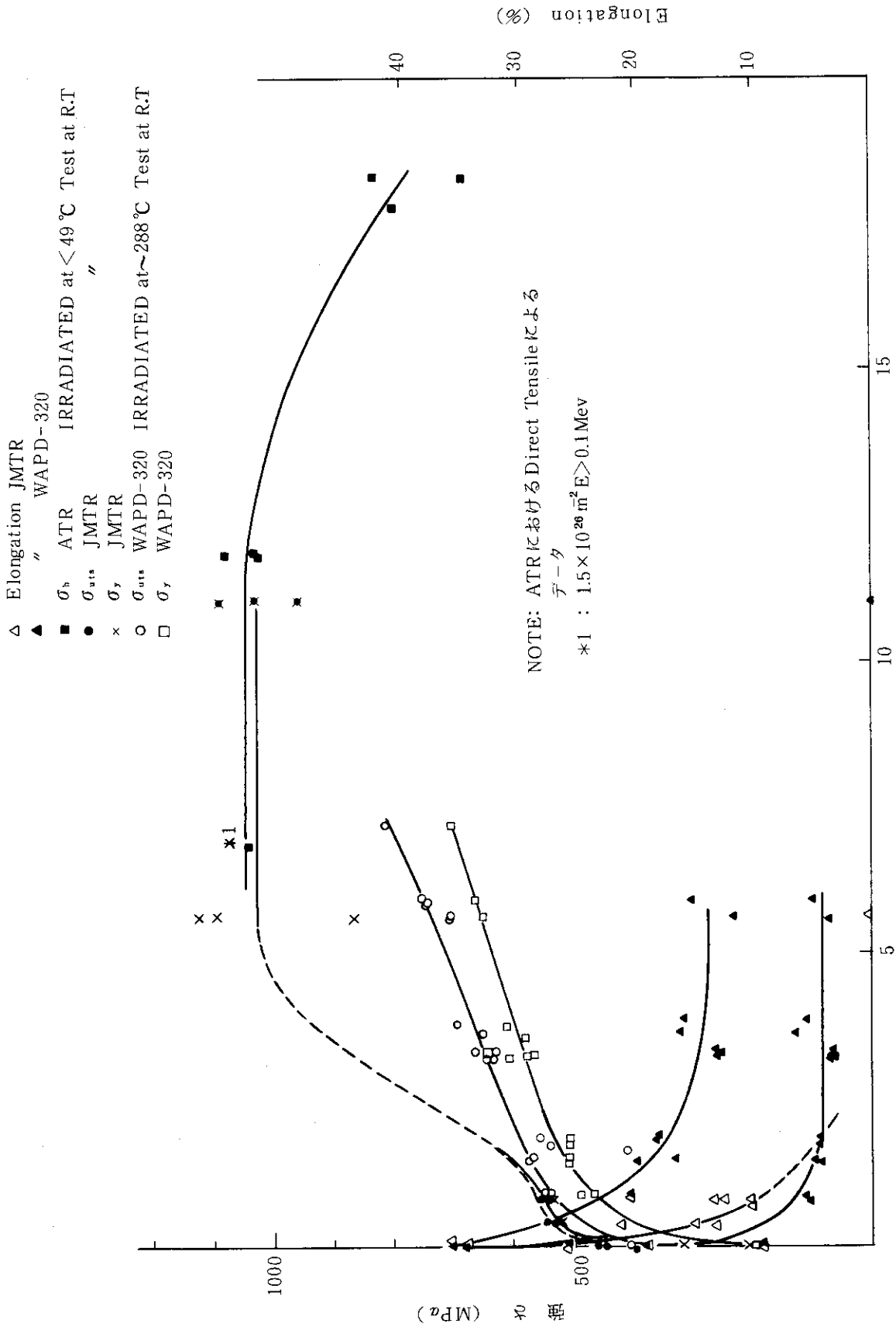
表7 ハフニウム材の化学成分

場所 元 素	Top	Center	Bottom
Hf	> 95.3 %	> 95.3 %	> 95.3 %
Zr	3.4 %	3.3 %	3.3 %
Al	< 30	< 30	< 30
Cu	< 20	< 20	< 20
Fe	225	275	235
Ti	35	31	30
W	< 30	< 30	< 30
Mo	< 5	< 5	< 5
Ta	< 100	< 100	< 100
Cb	< 50	< 50	< 50
N	17	12	17
H	5	5	5
O	250	290	350
C	< 40	< 40	< 40
U	< 0.5	< 0.5	< 0.5
U ²³⁵	< 0.007		
Cr	< 10	< 10	< 10

表示なき単位は ppm

表 8 ハフニウム引張試験データ

試験片 No	高速中性子 照射量 $E > 1\text{Mev}$	試験温度 (°C)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	キャプセル No
未照射 T. T	0	R. T	422.4	292.0		33.0	41.0		
" B. T	"	"	415.5	286.2		32.0	43.0		
" T. L	"	"	434.1	209.7		28.0	41.0		
" B. L	"	"	428.3	207.8		32.0	41.0		
H-1	3.7×10^{24}	20	539.0	522.3	394.0	21.4		A	67M44 J-1
H-2	"	20	529.2	522.3	409.6	13.6		B	"
H-3	"	20	545.9	532.1	411.6	15.0		B	"
H-4	7.4×10^{24}	20	551.7	545.9		12.9		B	67M44 J-2
H-5	"	19	539.0	532.1		12.9		B	"
H-6	"	19	553.7	550.8		13.6		B	"
H-7	5.6×10^{25}	19	1127.0	1127.0		0.0		B	67M44 J-3
H-8	"	20	862.4	862.4		0.0		C	"
H-9	"	20	1102.5	1102.5		0.0		C	"
H-10	1.1×10^{26}	21	1082.9	1082.9	1082.9	0.0		C	67M44 J-4
H-11	"	21	954.5	954.5	954.5	0.0		C	"
H-12	"	21	1034.9	1034.9	1034.9	0.0		C	"



高速中性子照射量 $\times 10^{25} \text{ m}^2$ ($E > 1 \text{ Mev}$)

図9 ハフニウムの高速中性子照射量と強度・伸びの関係

表9 ハフニウム衝撃試験データ

試験片 No	高速中性子 照射量 $E > 1\text{Mev}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ハンマ 持上角度	ハンマ 振上角度	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (10^3 J/m^2)	試験機容量 (J)	断面積 (m^{-4})	備 考
Top. Trans.	0	R. T			0.20	5.09			
Bot. Trans.	0	R. T			0.24	6.02			
Top. Longi.	0	R. T			0.17	4.32			
Bot. Longi.	0	R. T			0.19	4.75			
H-1	4.0×10^{24}	R. T	$132^{\circ}30''$	$121^{\circ}50''$	0.26	6.54	294		
H-2	"	R. T	"	$129^{\circ}20''$	0.09	2.28	"		
H-3	"	R. T	"	$129^{\circ}40''$	0.10	2.48	"		
H-4	6.9×10^{24}	19	"	$120^{\circ}10''$	0.30	7.62	"		
H-5	"	19	"	$121^{\circ}50''$	0.26	6.54	"		
H-6	7.9×10^{24}	19	"	$124^{\circ}20''$	0.20	4.94	"		
H-7	8.0×10^{25}	19	"	$130^{\circ}40''$	0.04	1.12	"		
H-8	"	19	"	$130^{\circ}50''$	0.04	1.02	"		
H-9	6.1×10^{25}	19	"	$61^{\circ}00''$					破断試験片がはさまる
H-10	1.2×10^{26}	23	$150^{\circ}00''$	$116^{\circ}00''$	0.009	0.23	3.92		
H-11	"	23	"	$115^{\circ}30''$	0.009	0.23	"		
H-12	1.2×10^{26}	23	"	$117^{\circ}00''$	0.009	0.22	"		

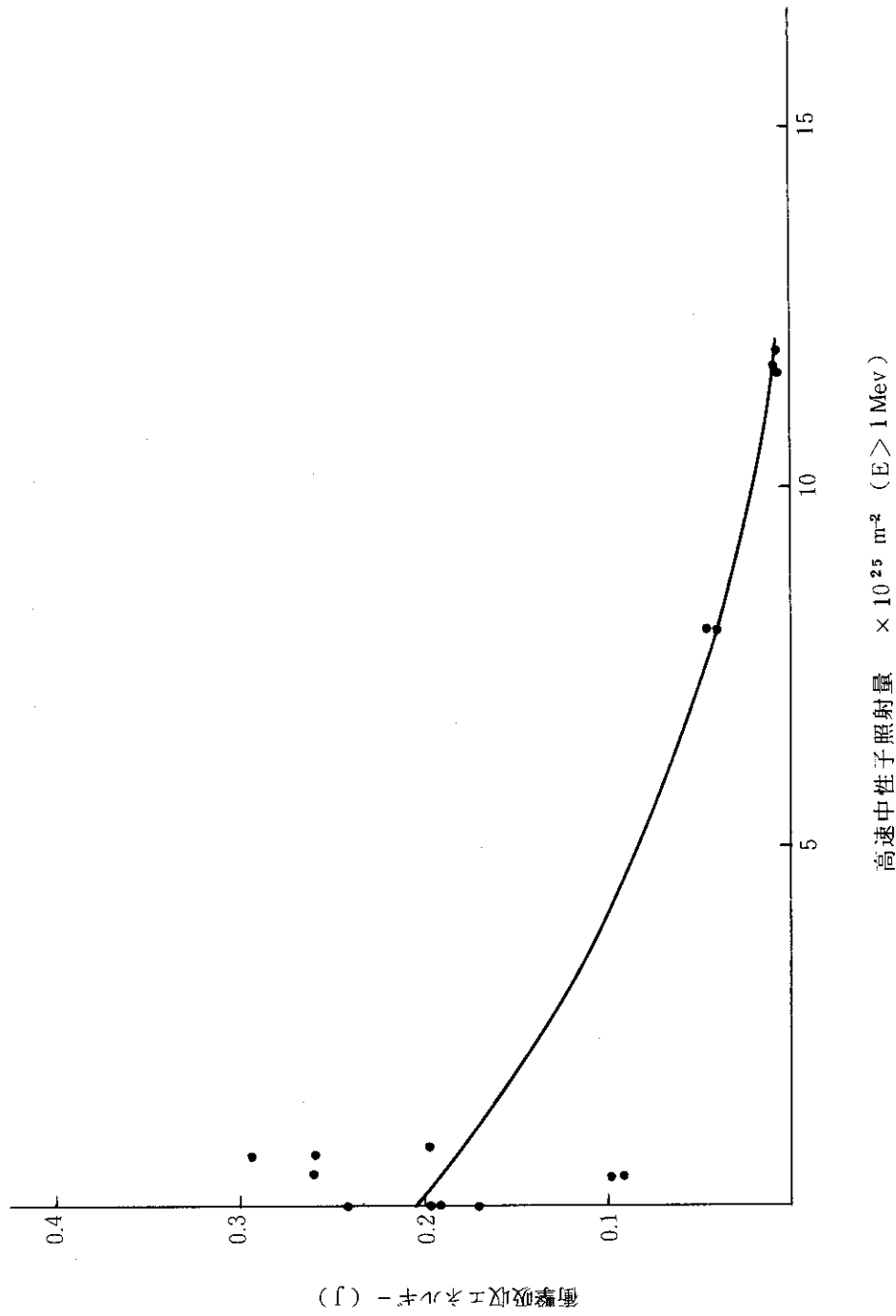


図10 ハフニウムの高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係

表10 SUS 304, 17-4 PH, SUS 304 Lの化学成分

	SUS 304	17-4 PH	SUS 304 L
C	0.06	0.04	0.02
Si	0.52	0.49	0.84
Mn	0.93	0.60	1.59
P	0.029	0.022	0.26
S	0.016	0.011	0.10
Ni	9.86	4.16	10.47
Cr	18.03	16.55	18.55
Mo			
Co	0.095		0.27
Cu		3.75	

単位%, 残りはFe

表11 17-4PH引張試験データ

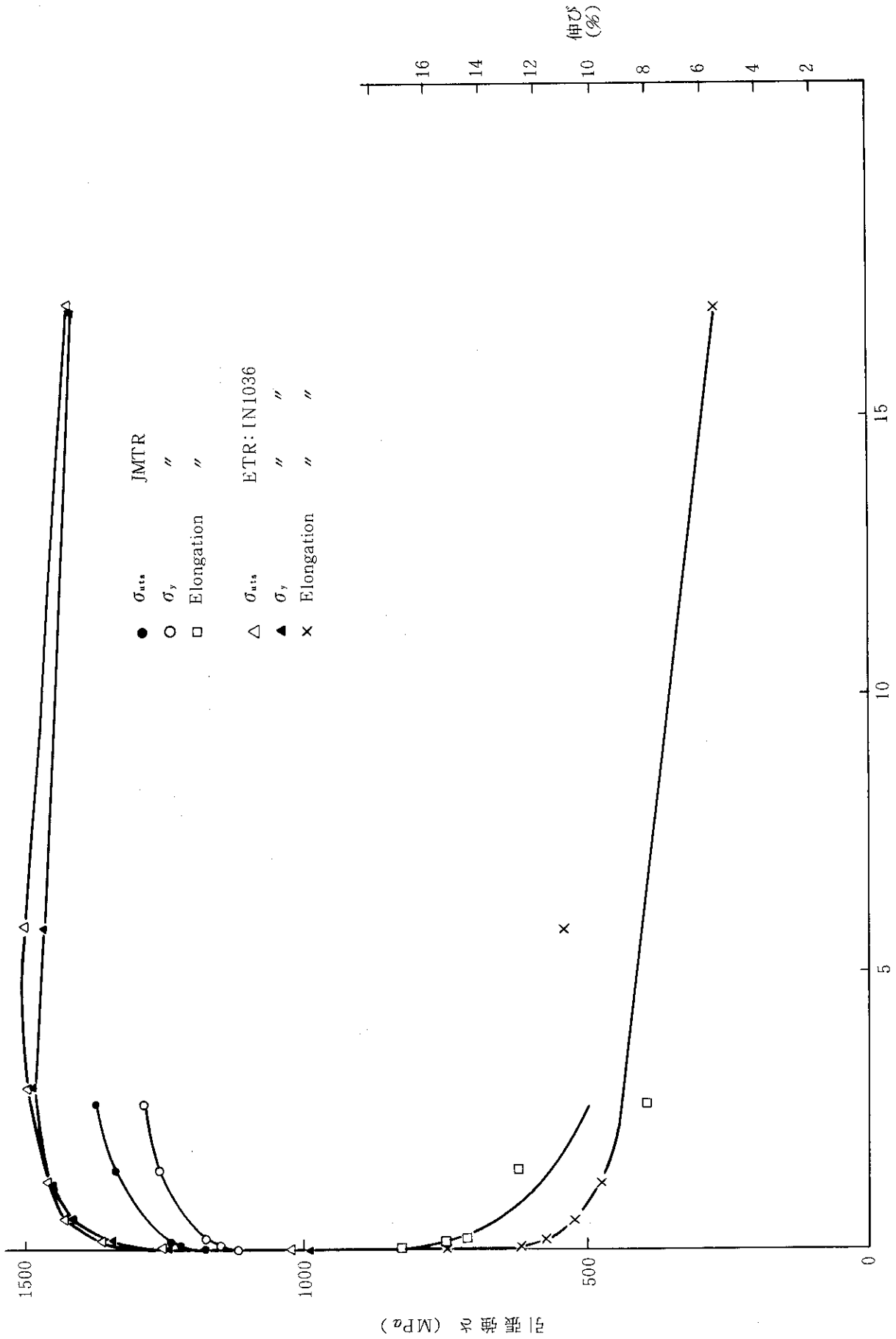
試験片 No	高速中性子 照射量 $E > 1 \text{ Mev}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	キャブセル No.
未照射			1,365.1	1,337.7		12.0	49.0		
"			1,351.4	1,324.0		11.0	50.0		
"			1,400.4	1,351.4		14.0	52.0		
"			1,172.1	1,117.2		16.8			
P-1	0.9×10^{24}	19	1,222.1	1,184.8	794.8	14.8		B	67M44J-1
P-2	"	19	1,226.0	1,107.4	775.2	16.0		A	"
P-3	1.7×10^{24}	19	1,247.5	1,169.1		15.0		B	67M44J-2
P-4	"	19	1,235.8	1,176.0		14.2		B	"
P-5	1.4×10^{25}	19	1,345.5	1,329.9		13.3		B	67M44J-3
P-6	"	19	1,334.8	1,316.1		12.1		B	"
P-7	2.6×10^{25}	20	1,365.1	1,286.7	896.7	7.1		B	67M44J-4
P-8	"	20	1,373.0	1,278.9	849.7	8.8		B	"

表12 17-4 PH 衝撃試験データ

試験片 No	高速中性子 照射量 $E > 1\text{Mev}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ハンマ 持上角度	ハンマ 振上角度	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (10^3 J/m^2)	試験機容量 (J)	断面積 (m^{-4})	備 考
未照射	0	R. T			0.47	9.41			
P-1	3.0×10^{24}	R. T	$132^{\circ}30'$	$118^{\circ}50'$	0.34	8.51	294		
P-2	"	R. T	"	$128^{\circ}10'$	0.11	2.77	"		
P-3	2.0×10^{24}	R. T	"	$115^{\circ}20'$	0.45	11.32	"		
P-4	"	R. T	"	$127^{\circ}10'$	0.14	3.38	"		
P-5	6.0×10^{24}	19	"	$124^{\circ}10'$	0.20	5.04	"		
P-6	"	19	"	$119^{\circ}50'$	0.31	7.85	"		
P-7	4.0×10^{24}	19	"	$125^{\circ}00'$	0.18	4.52	"		
P-8	"	19	"	$125^{\circ}20'$	0.17	4.31	"		
P-9	4.5×10^{25}	19	"	$130^{\circ}30'$	0.05	1.21	"		
P-10	"	19	"	$129^{\circ}40'$	0.07	1.70	"		
P-11	3.0×10^{25}	19	"	$128^{\circ}20'$	0.10	2.48	"		
P-12	"	19	"	$129^{\circ}20'$	0.08	1.89	"		

NOTE: 粗い計算による試験片温度は約80 $^{\circ}\text{C}$ である。

: 試験片 No P-13~P-16 (高速中性子照射量 6.0×10^{25} , $8.8 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$) は, 放射エネルギーが JMTR ホットラボの材料試験セルの取扱量を超えたため, 試験を実施せず, 試料は廃棄。



高速中性子照射量 $\times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$)

図11 17-4PHの高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係

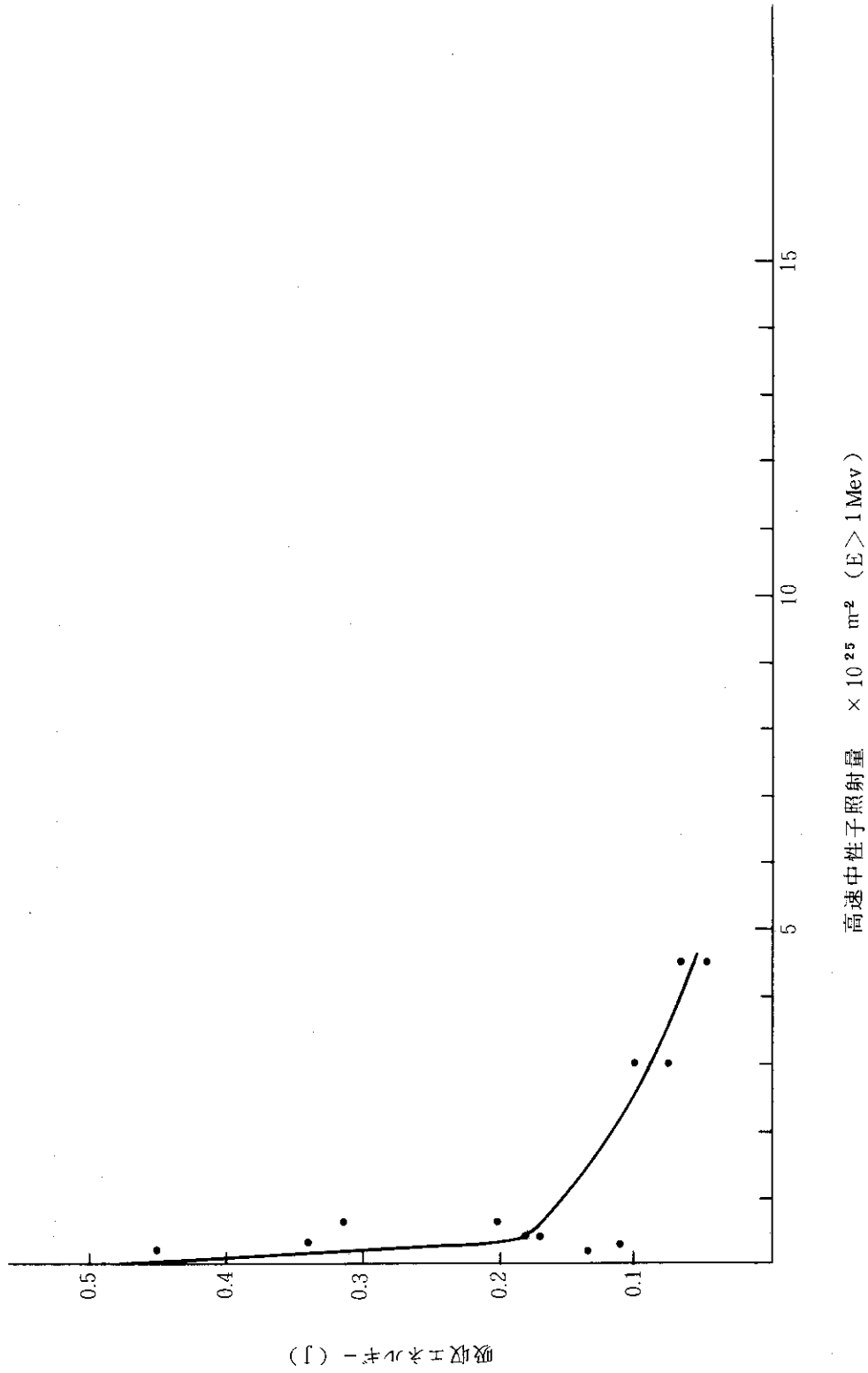


図12 17-4PHの高速中性子照射量と衝撃吸収エネルギーの関係

表13 SUS 304引張試験データ

試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1\text{MeV}$	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	キャップセル No.
未照射	0		541.0	229.3		60.0	64	A	
G-1	1.6×10^{24}	19	596.8	509.6		24.8		B	67M44J-1
G-2	"	"	579.2	493.9		22.2		C	"
G-3	"	"	572.3	500.8		20.4		C	"
G-4	3.0×10^{24}	20	600.7	505.7		25.4		A	67M44J-2
G-5	"	"	609.6	518.4		28.5		A	"
G-6	"	"	614.5	555.7		21.5		A	"
G-7	2.3×10^{25}	"	625.2	570.4		20.0		B	67M44J-3
G-8	"	"	627.2	546.8		26.9		B	"
G-9	"	"	590.0	518.4		19.2		B	"
G-10	4.4×10^{25}	23	605.6	532.1		28.0	20	B	67M44J-4
G-11	"	"	607.6	544.9		25.0	28	A	"
G-12	"	"	592.9	512.5		28.0	32	B	"

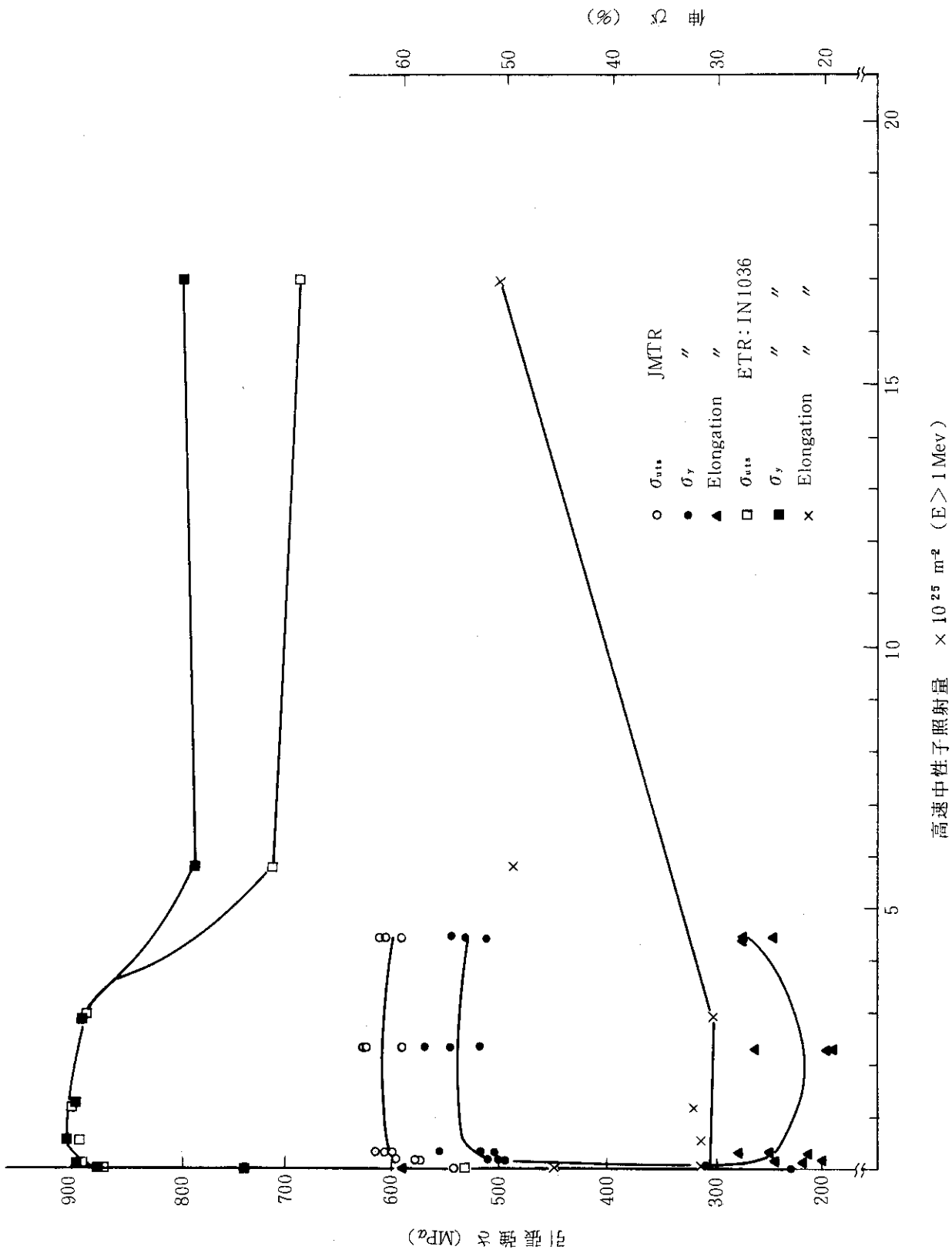


図13 SUS 304 の高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係

表14 SUS 304 L 引張試験データ

試験片 No.	高速中性子 照射量 $E > 1\text{Mev}$	試験温度 (°C)	引張り強さ (MPa)	耐力 (MPa)	破断強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置 JIS	備考
B 1	1.0×10^{18}	23	590.9	236.2	478.2	75	69	A	母材
B 2	"	23	590.0	212.7	476.3	77	70	A	"
B 3	"	23	590.0	218.5	480.2	76	69	A	"
W 1	"	23	535.1	303.8	500.8	54	51	A	溶接部
W 2	"	23	534.1	282.2	508.6	51	50	A	"
W 3	"	23	536.1	275.4	508.6	56	49	B	"
B 4	1.2×10^{19}	23	585.1	207.8	468.4	76	70	A	母材
B 5	"	23	582.1	203.8	463.5	73	69	A	"
B 6	"	23	583.1	213.6	470.4	74	68	A	"
W 4	"	23	528.2	269.5	495.9	47	50	A	溶接部
W 5	"	23	531.2	269.5	500.8	48	49	A	"
W 6	"	23	535.1	277.3	509.6	53	48	A	"
E 2804*	0		519.4	176.4	176.4	67			HB : 139
"	0		519.4	176.4	176.4	67			HB : 139
E 2873*	0		539.0	186.2	186.2	61			HB : 141
"	0		539.0	186.2	186.2	61			HB : 141
E 2809*	0		519.4	176.4	176.4	64			HB : 132
D 42402*	0		558.6	225.4	225.4	63			HB : 134
"	0		558.6	225.4	225.4	63			HB : 134
"	0		558.6	225.4	225.4	63			HB : 134

* 圧力容器材料検査試験成績書より、照射試験片と同様の材料、加工、熱処理がされた。圧力容器胸部の試験データ

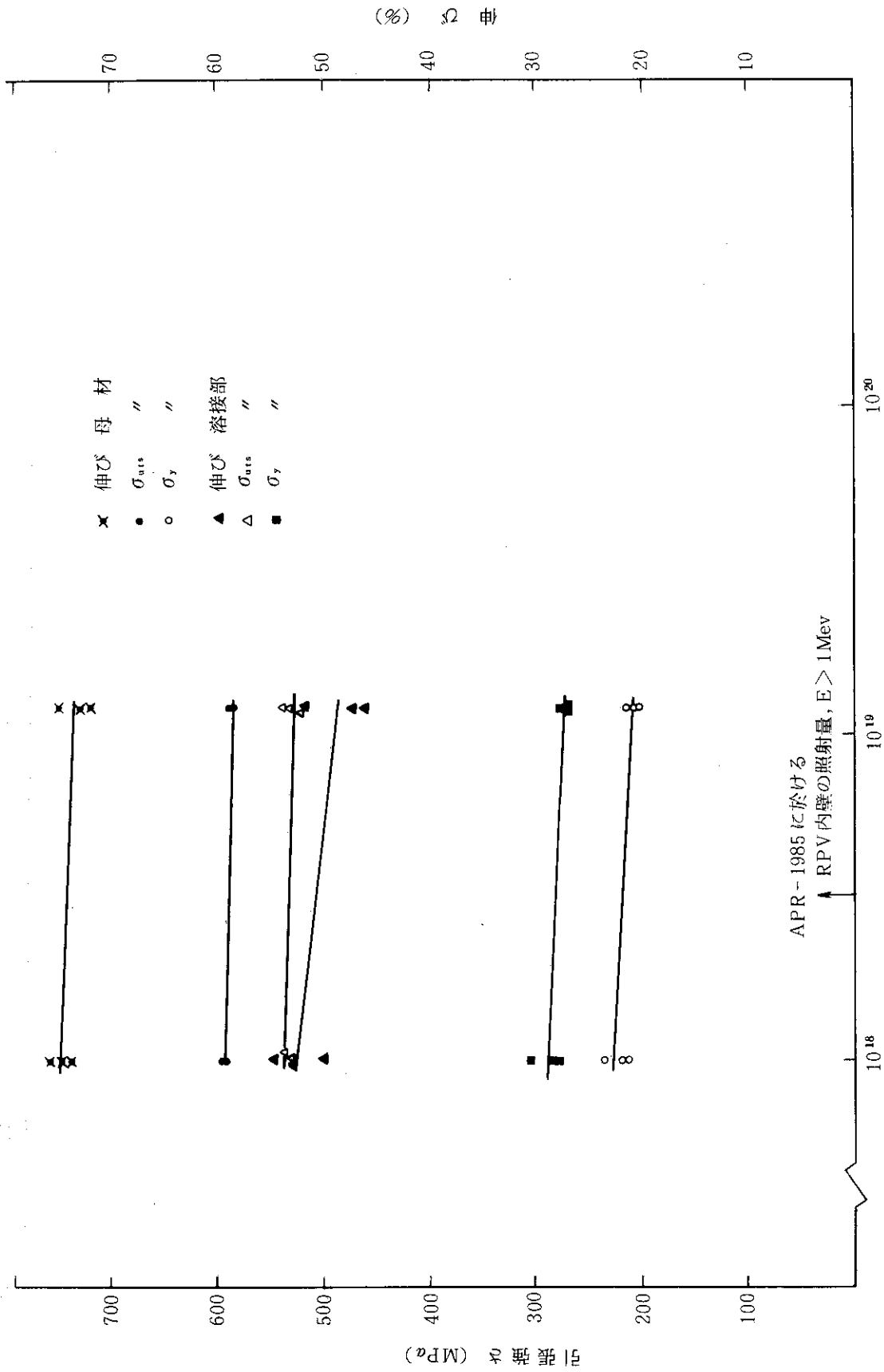
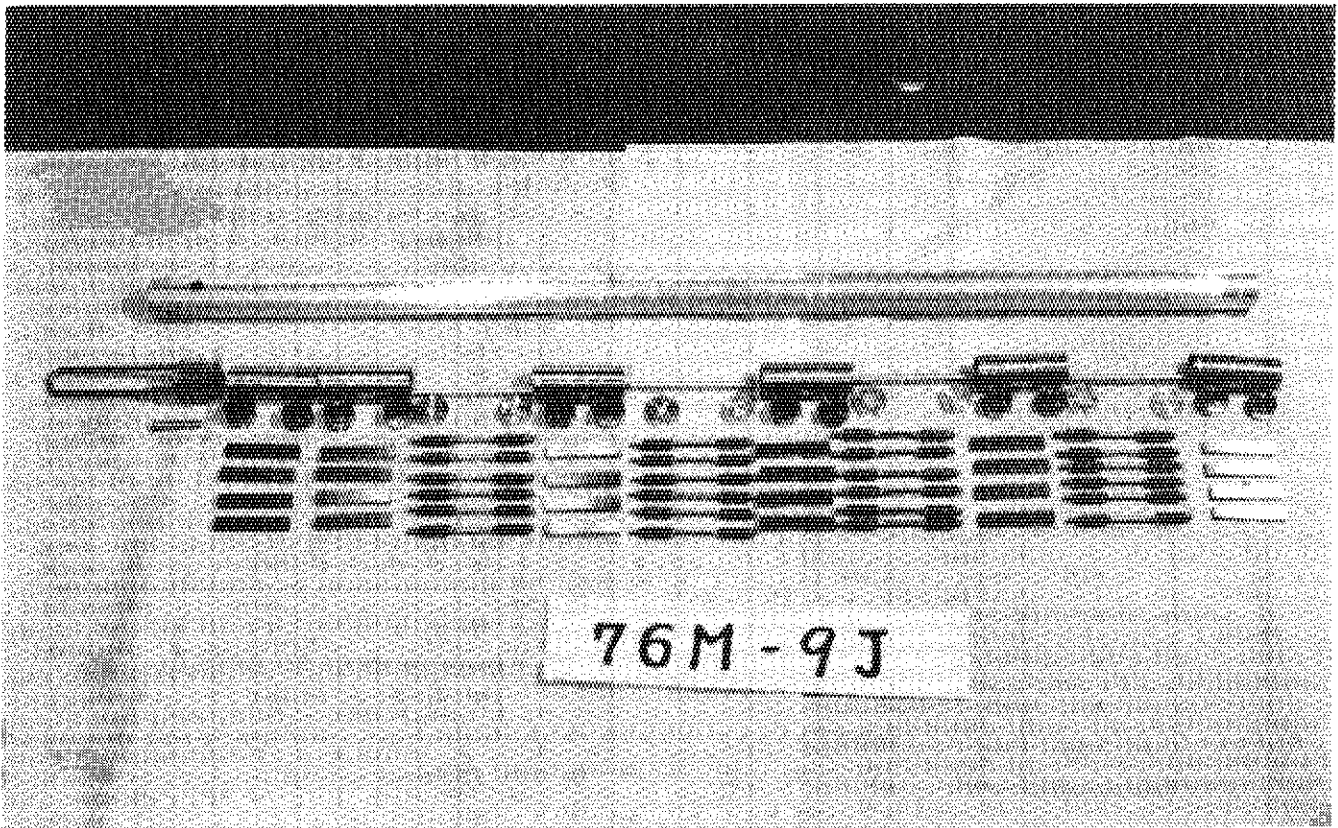
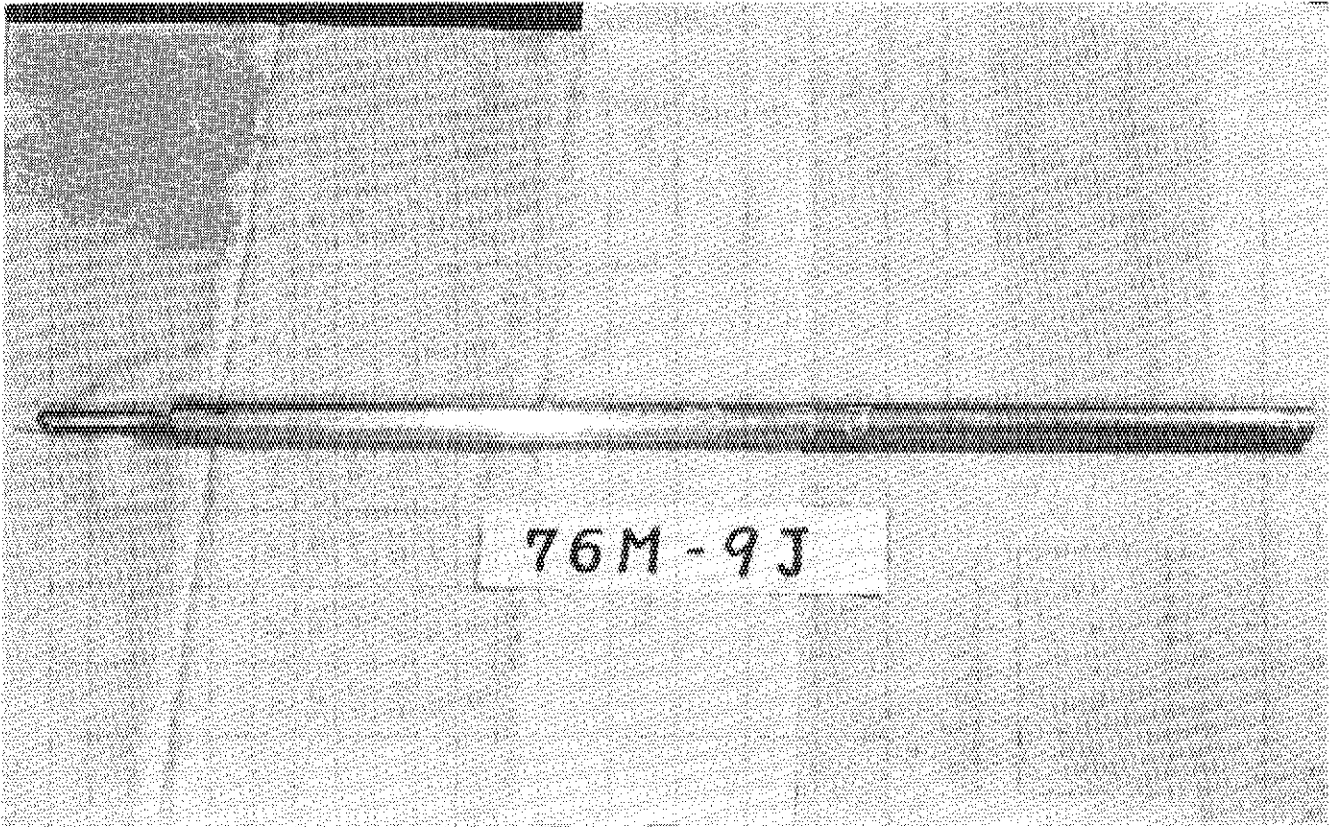


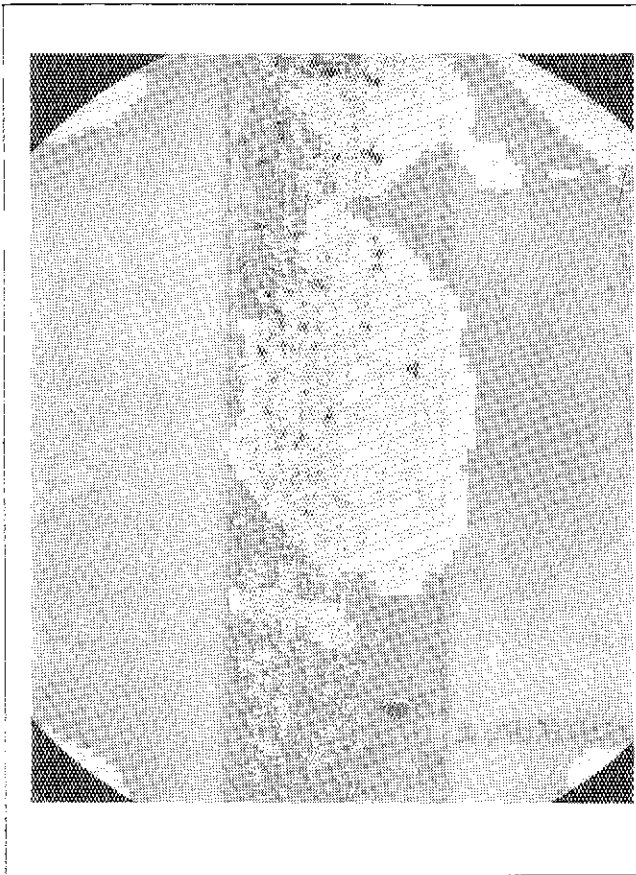
図14 SUS 304Lの高速中性子照射量と引張強さ・伸びの関係

表15 SUS 304L 硬さ試験データ

照射試料 No.	試験荷重 (kg)	負荷時間 (Sec)	測定 研磨面	補正係数	B-1		H-1		B-16		H-16	
					縦	横	縦	横	縦	横	縦	横
1	10	25	DP-3 μ	1,003	359	357	359	359	345	341	352	352
2	10	25	DP-3 μ	1,003	358	352	354	336	336	332	342	346
3	10	25	DP-3 μ	1,003	361	357	345	333	334	334	344	342
4	10	25	DP-3 μ	1,003	360	359	350	340	340	337	346	338
5	10	25	DP-3 μ	1,003	363	363	343	340	341	341	336	339
6	10	25	DP-3 μ	1,003			337				350	356
7	10	25	DP-3 μ	1,003			348				336	337
8	10	25	DP-3 μ	1,003			342				335	329
9	10	25	DP-3 μ	1,003			342				342	341
10	10	25	DP-3 μ	1,003			344				350	347
1	25	25	DP-3 μ	1,003	359	359	359	359	345	341	352	352
2	25	25	DP-3 μ	1,003	358	352	354	336	336	332	342	346
3	25	25	DP-3 μ	1,003	361	357	345	333	334	334	344	342
4	25	25	DP-3 μ	1,003	360	359	350	340	340	337	346	338
5	25	25	DP-3 μ	1,003	363	363	343	340	341	341	336	339
6	25	25	DP-3 μ	1,003			337				350	353
7	25	25	DP-3 μ	1,003			348				336	337
8	25	25	DP-3 μ	1,003			342				335	329
9	25	25	DP-3 μ	1,003			342				342	341
10	25	25	DP-3 μ	1,003			344				350	347

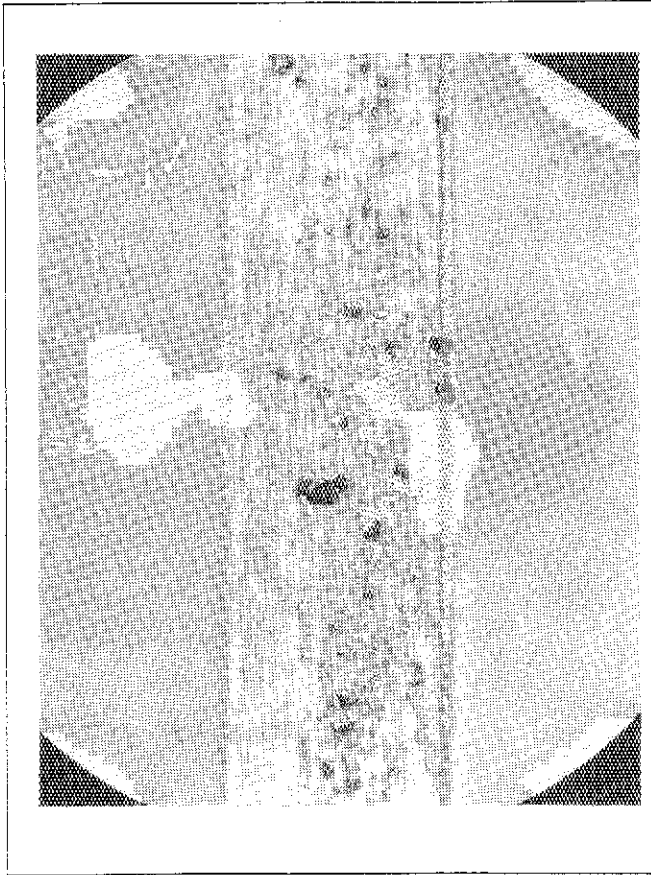


附録A 照射キャプセルの外観写真



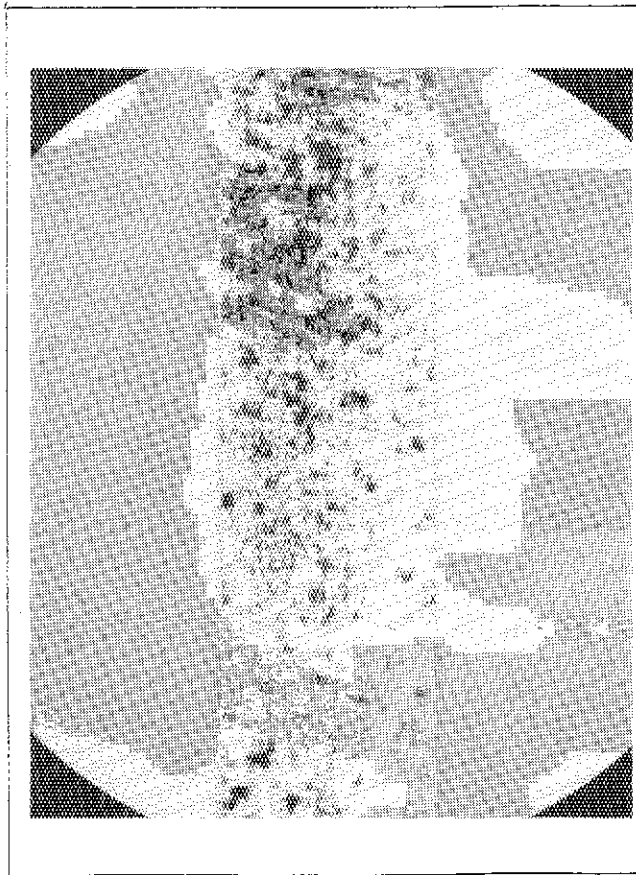
J-13

MAG. x 5



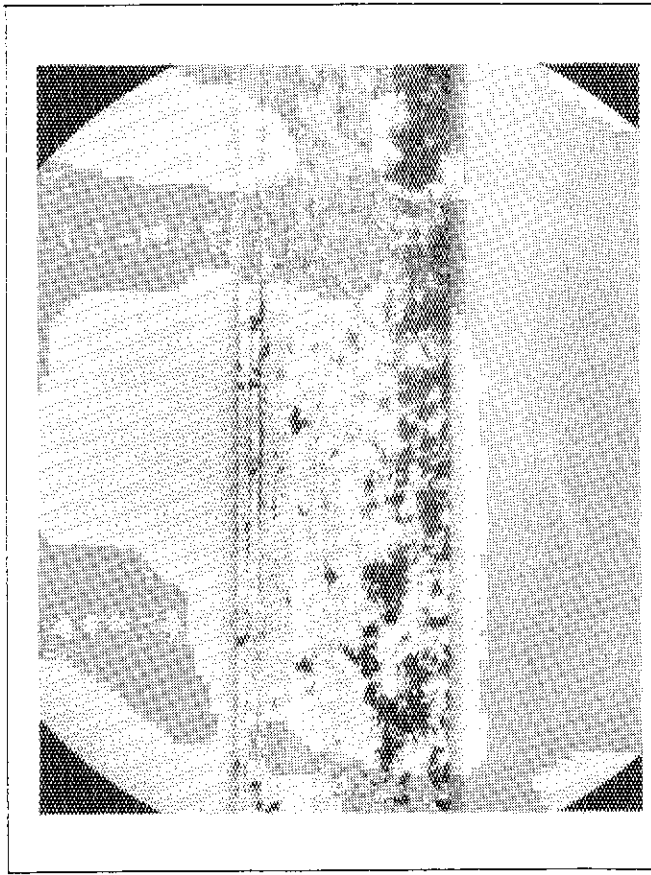
L-14

MAG. x 5



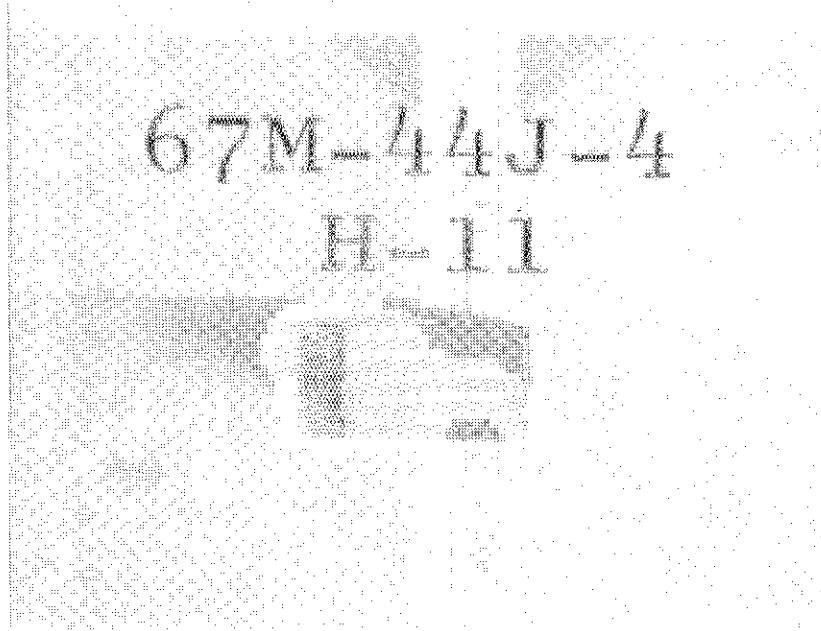
H-17

MAG. x 5

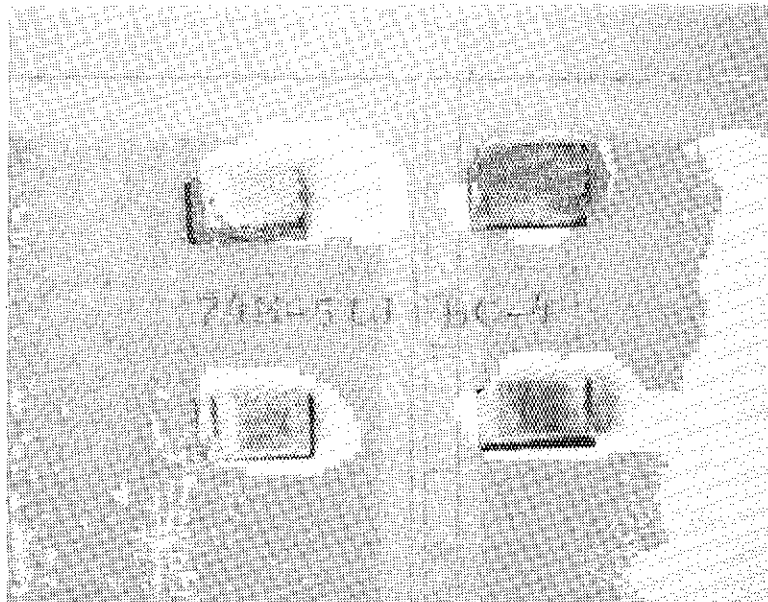


L-13

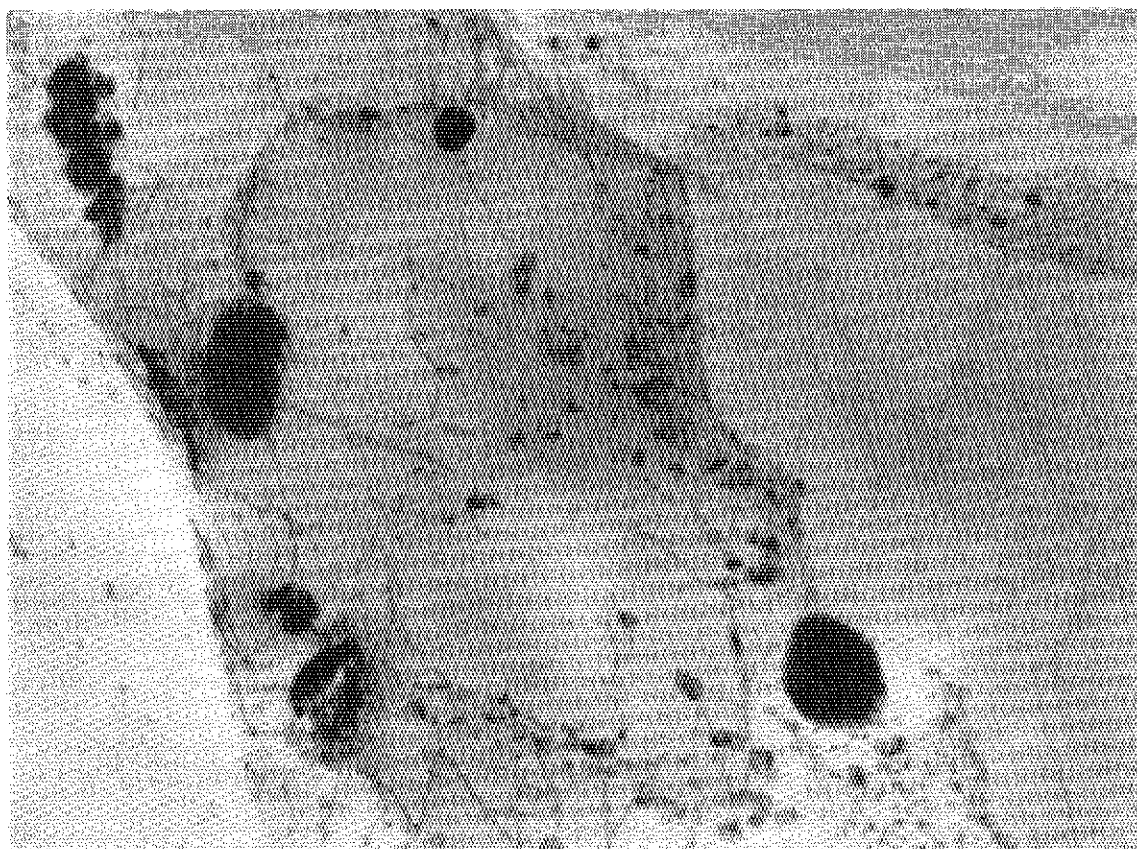
MAG. x 5



附録B-2 ハフニウム衝撃試験片断面写真

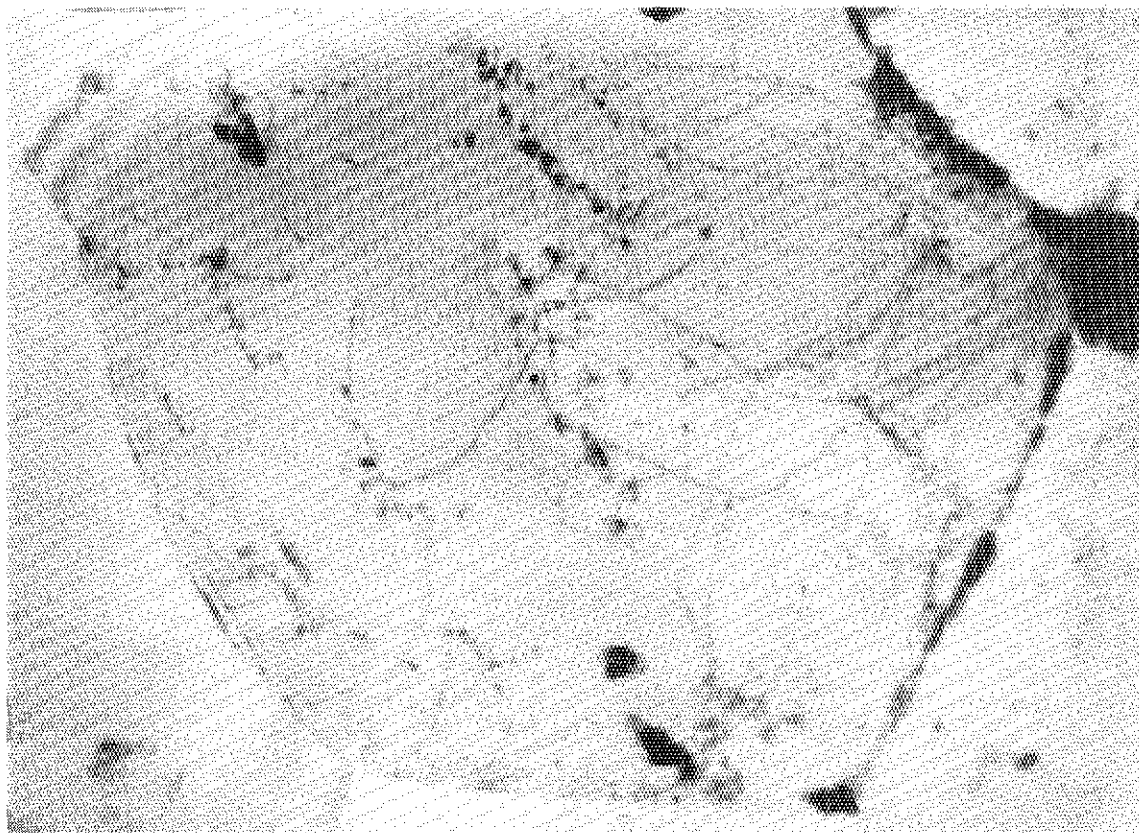


附録B-3 ベリリウム衝撃試験片断面写真



試 料：未照射ベリリウム
倍 率：×22000
試験条件：200KV, Direct

図C-1 未照射ベリリウムの電顕写真



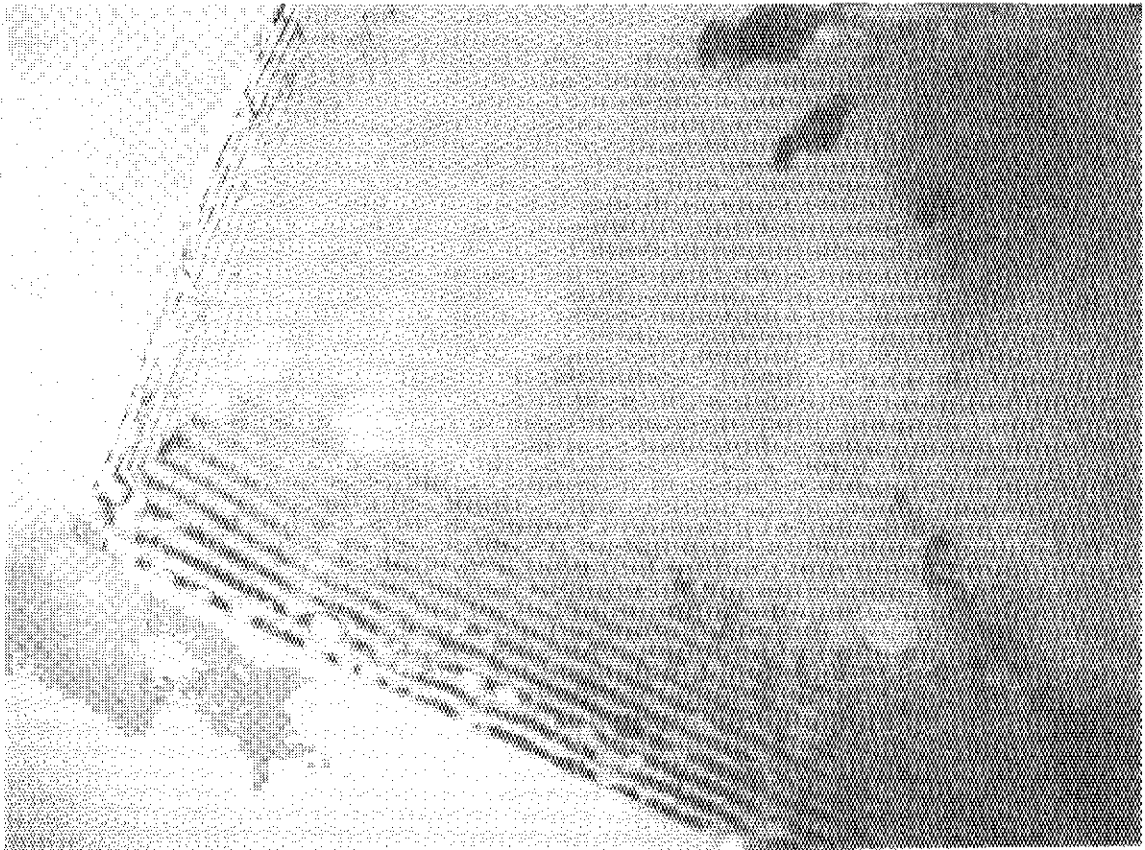
試 料：67M43J/BC-1

照射量 $1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1\text{Mev}$)

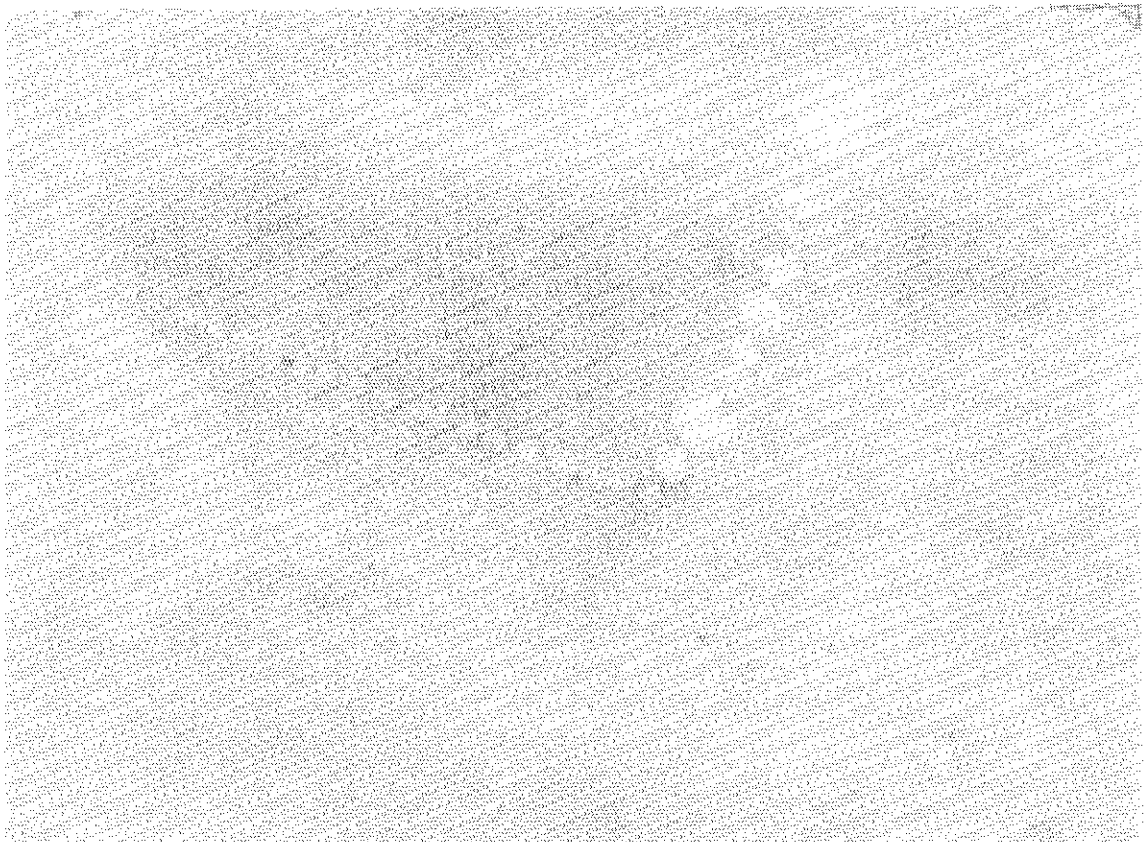
倍 率： $\times 22000$

試験条件：200KV, Direct

図C-2 $1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真



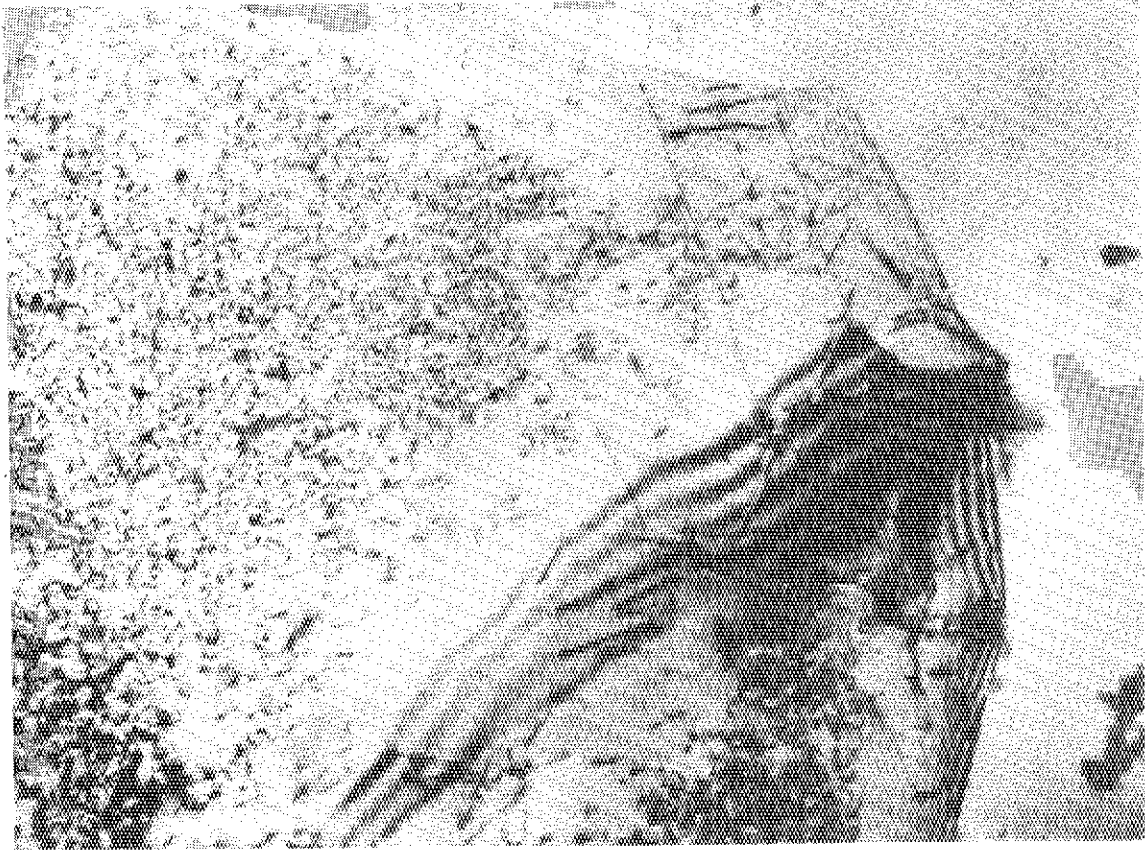
倍率：×22000



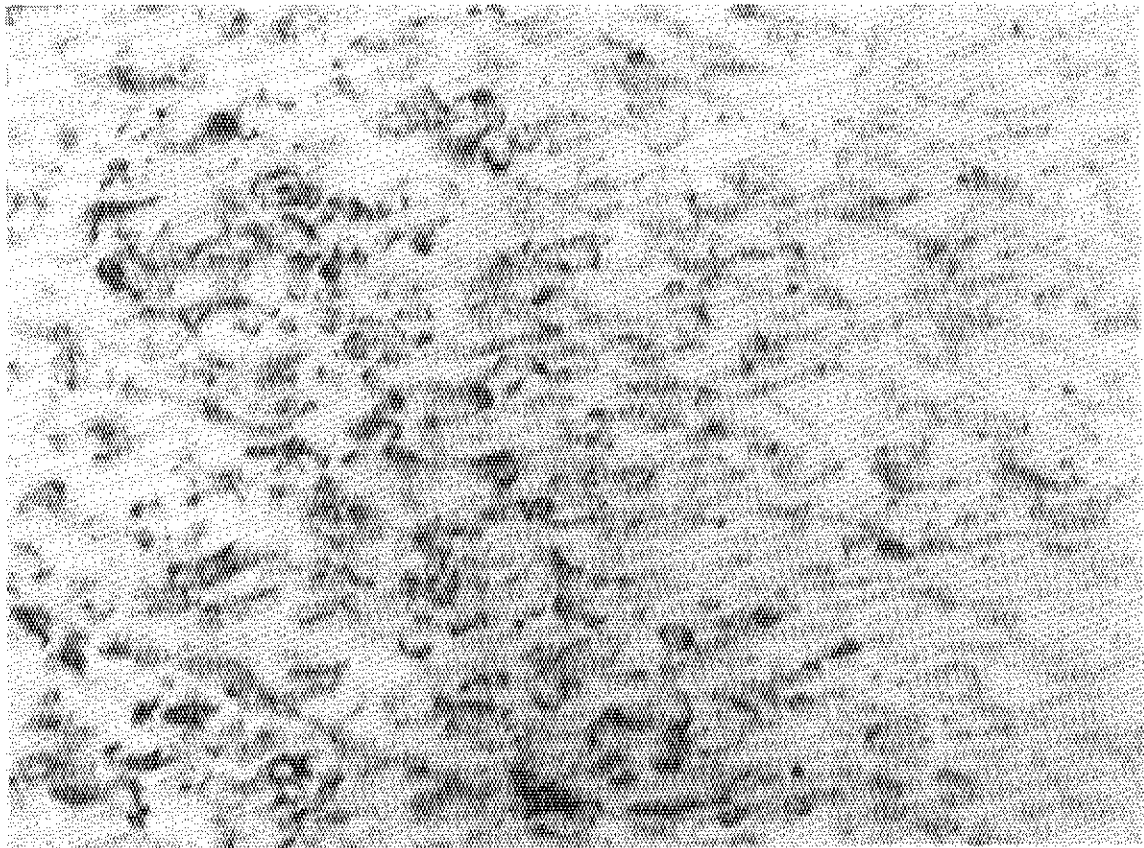
倍率：×66000

試料：67M43J/BC-1 照射後焼鈍 900℃×1時間

図C-2 $1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真 (続)

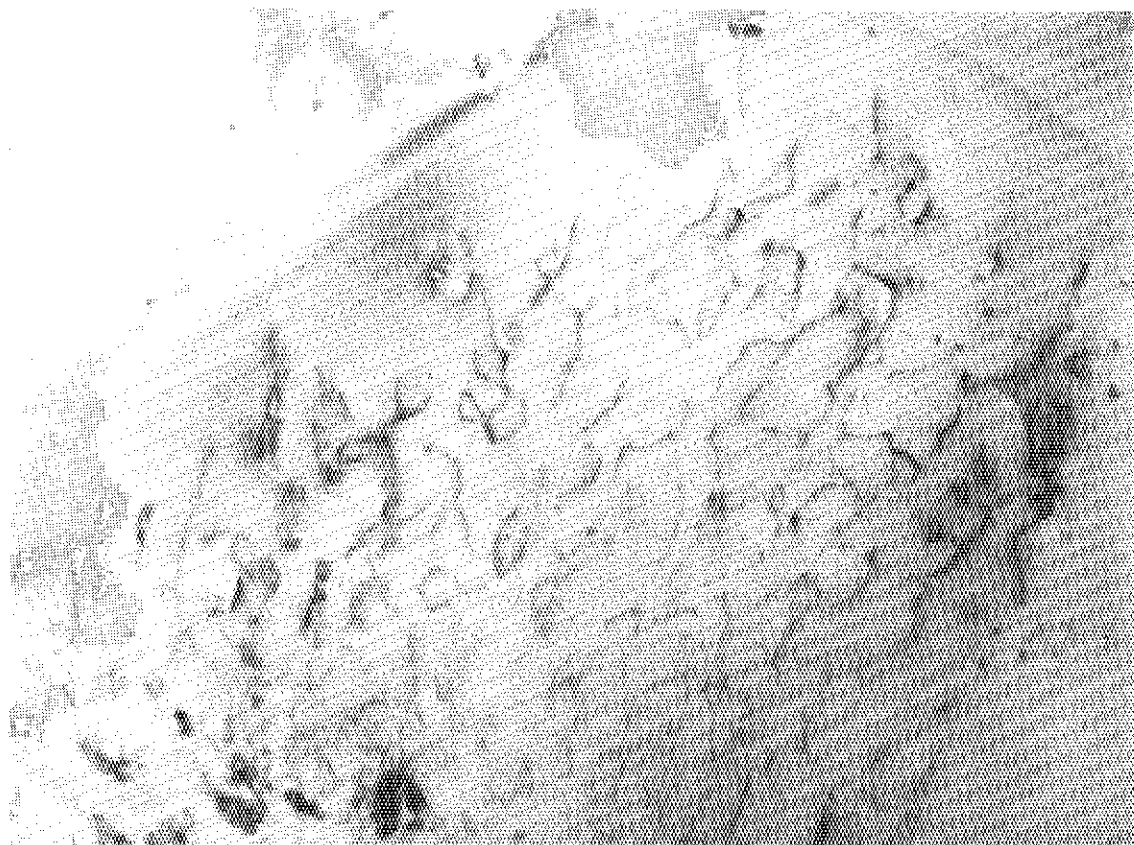


倍率：×22000

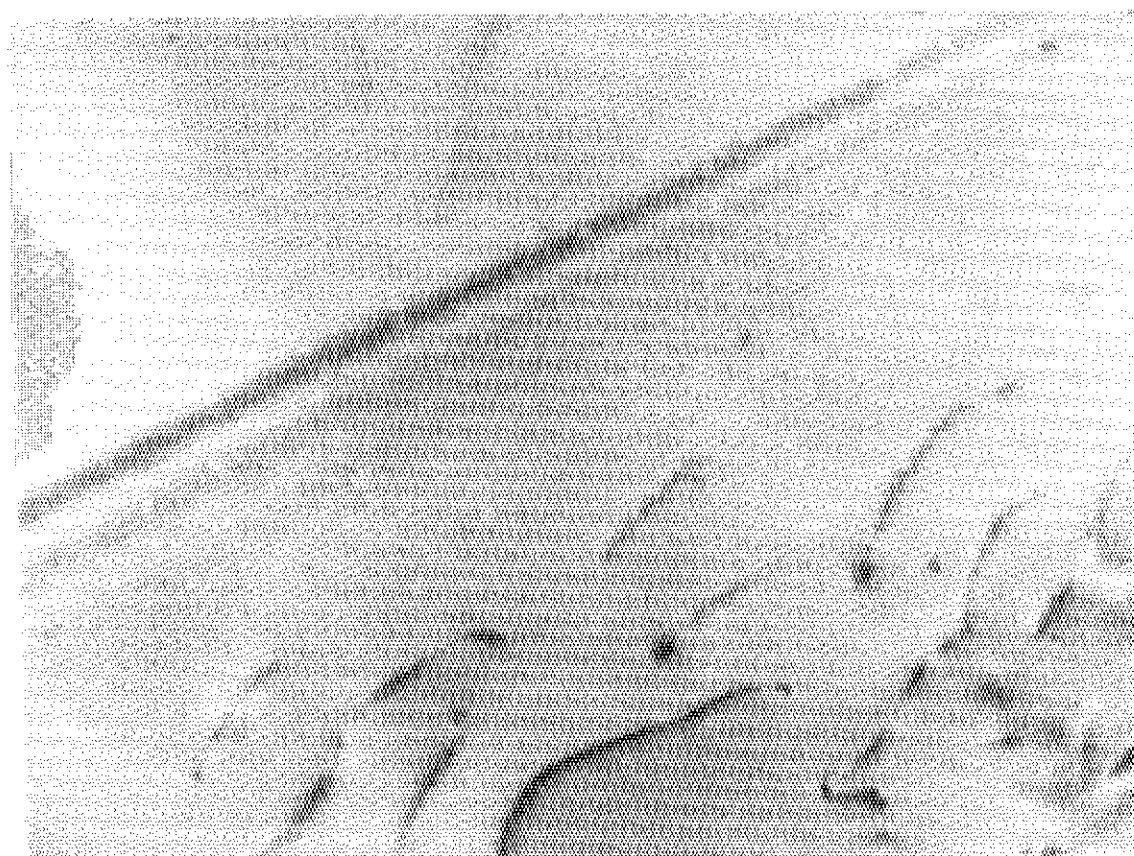


倍率：×66000

試料：67M44J-3/BC-9 照射量 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$)
図C-3 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真

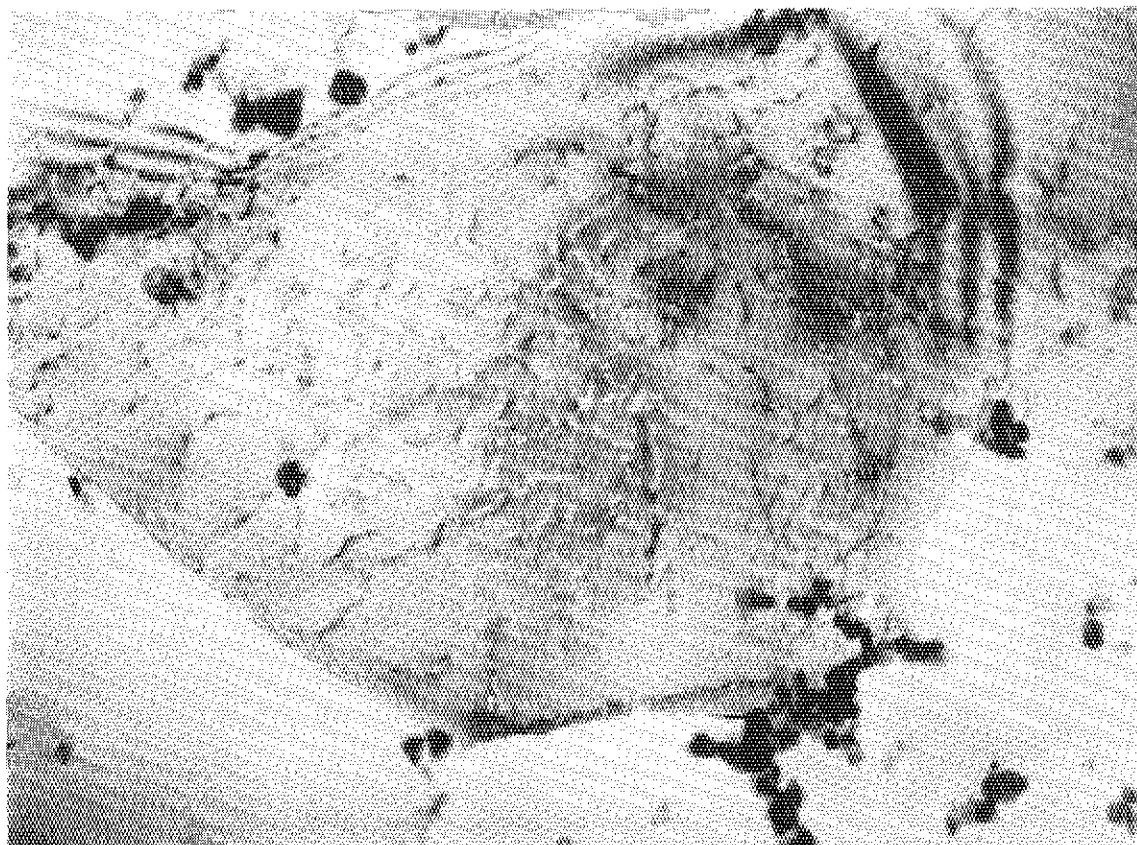


倍率：×22000

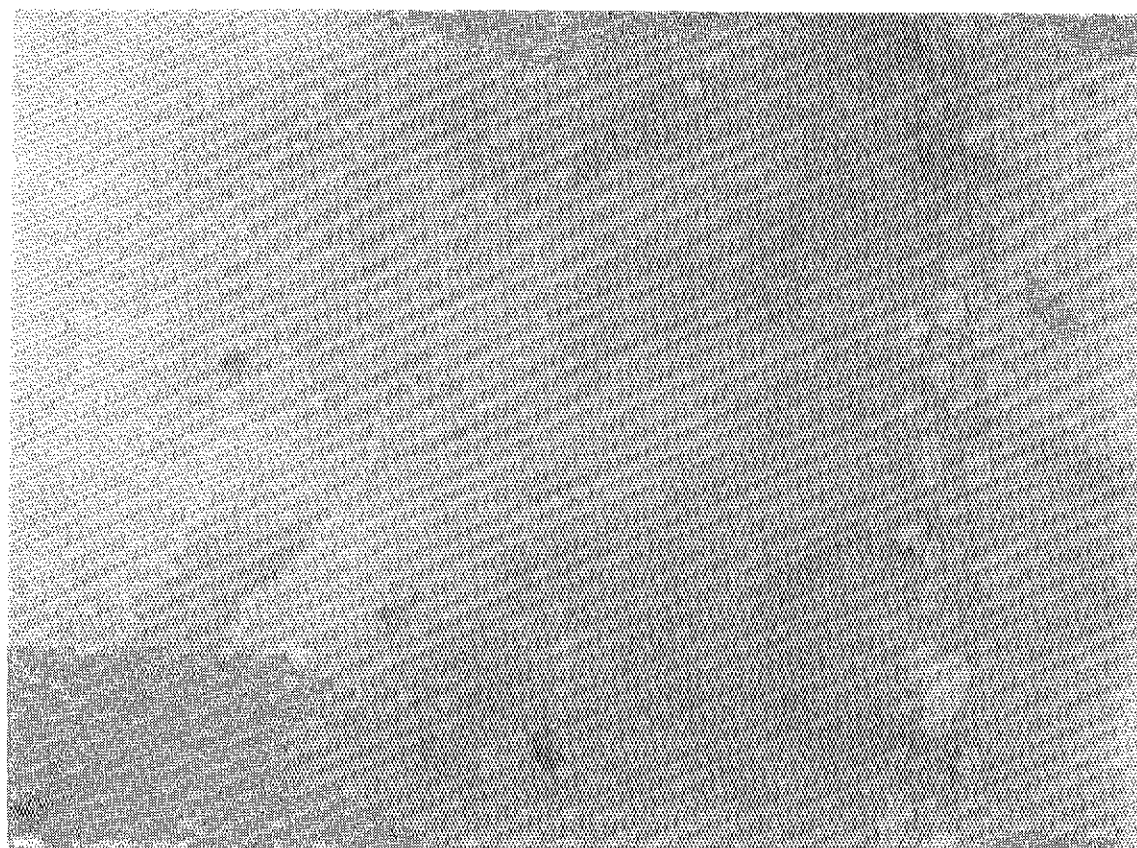


倍率：×132000

試料：67M44J-3/BC-9 照射量 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$), 照射後 600°C 1時間焼鈍
図C-3 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの写真 (続)



倍率：×22000



倍率：×66000

試料：67M44J-3/BC-9 照射量 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1 \text{ Mev}$), 照射後 700°C 1時間焼鈍

図C-3 $4.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 照射ベリリウムの電顕写真 (続)