

JAERI-M

5648

JMTR試用期間照射報告書
第4部ジルコニウム・その他の材料

1974年3月

材料試験炉部

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JMTR 試用期間照射報告書・第4部(ジルコニウム・その他の材料)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験部

(1974年2月12日受理)

JMTRの試用期間における照射試料のうち、ジルコニウム、ベリリウム、制御材、その他の材料、大学関係、およびラジオアイソトープ製造関係の照射、ならびに照射後試験の結果についてまとめたもので、第1分冊～第3分冊に続くものである。ジルコニウムは、ジルカロイ-2とジルカロイ-4およびZr-2.5Nb合金などの熱処理したものを照射し、引張強さ、硬さ、衝撃、金相などの照射後試験を行なった。ベリリウムではBe-Ca合金材と耐ヘリウム損傷改善のために種々の元素を微量添加したものについて試験が行なわれた。制御材はボロン入り材料、Ag-In-Cd合金、 B_4C 粉末充填材、希土類酸化物材など、特殊材料ではNb-Zr、Nb-V、V-Ti合金、インコネル600などの照射試験がそれぞれ行なわれた。これらの照射後試験の結果は有用なものも多数ある。大学関係の照射試験結果はその研究機関で詳細な報告が、RI関係はJAERI-M5363により報告されている。

Trial Irradiation in JMTR
Part 4 Zirconium and Other Materials

Division of JMTR, Oarai, JAERI
(Received February 12, 1974)

The results of post-irradiation examinations of zirconium alloys and other reactor materials, irradiation made during the test operation of JMTR, are described. The materials tested as follows:

1. Specimens for fuel cladding are zircaloy-2 and zircaloy-4.
2. Those for fuel cladding and reflector are Be-Ca alloys.
3. Intermetallic compounds as beryllium alloys, for the study of effect of precipitations on the helium babbles, are Be-Ce, Be-Cu, Be-Cr, Be-Mo, Be-Ni, Be-Ti, Be-V, Be-Y, and Be-Zr alloys.
4. Control-rod materials tested are stainless steel with 1 wt.% boron, aluminium-boron alloy, stainless steel-clad B_4C , silver-indium-cadmium alloy, and rare-earth oxide (Sm_2O_3 , Eu_2O_3 , and Gd_2O_3 , each 10 wt.%) dispersed in stainless steel.
5. Vanadium-based alloy for fast-reactor material is V-Ti alloy.
6. Niobium-based alloys are Nb-V and Nb-Zr.
7. Target materials irradiated for the study of handling and RI yields are twenty-eight in total.
8. The specimens irradiated for basic and applied resarches in educational institutions are many.

Obtained by the post-irradiation examinations should be useful for similar works in the future.

総 目 次

まえがき	1
IV Zr・制御材・その他の材料の試用期間照射結果報告書	5
V JMTRの試用期間照射結果報告書(大学関係)	83
VI JMTRの試用期間照射結果報告書(RI関係)	93
VII む す び	104
執筆者名簿	109
あとがき	110

ま え が き

原研では材料試験炉の完成引取り後、炉および照射運転技術に習熟すると共に、炉および照射装置の特性を測定、試験するため、約一年間の試用期間を設けることにした。

この期間の照射計画の作成に当っては、まづその基本方針をJ M T R 運営委員会に諮って決定し、照射計画の内容については利用小委員会において審議作成された。その基本方針は下記のとおりである。

試用期間の照射計画の基本的な考え方

J M T R の試用期間の照射については、材料試験炉部において、J M T R を使っての一連の照射試験を実施し、実用期間に入ってからスムーズに照射サービスが行なえるよう関連技術に習熟するとともに、今後照射実験を実施していくうえに必要な諸データを集積することを主目的とする。

試料については関係機関から提供を受けるものとし、原則として無料で照射を実施する。試用期間中の当初は、J M T R のホットラボは未完成で照射後試験は東海のホットラボを使用しなければならないが、照射が計画通りに実施されたか否かを知る必要があることから、照射後試験が必要である。

一方、試料は関係機関からの提供を受けることでもあるので試用期間中の照射とは言え、照射実験の練習と習熟のみに終始することなく、上記の主目的を逸脱しない範囲で、動力炉開発などに有用な照射データも得られるよう努力するようにする。

利用小委員会は昭和41年3月から43年5月にかけて、燃料、材料、R I および大学関係の4つのグループに分かれて照射計画の審議を行ったが、材料グループについては、さらにこれを鉄鋼材料とその他の材料の2つのグループに分け、前者については主に鉄鋼協会内に「J M T R 利用委員会」に依頼した。大学関係についても東北大学の「J M T R 共同利用施設」に、またR I については原研のR I 事業部に照射計画の原案作成をお願いした。

J M T R は昭和44年12月から運転を開始したが45年6月迄の第1、第2サイクルを特性試験期間と称して主に炉の諸特性を測定し、これにつづく46年6月迄の一年間、すなわち第3～第9サイクルを試用期間と称して主に試験照射を実施した。

試用期間に照射したキャプセルは、燃料キャプセル22本、材料(鉄鋼)キャプセル12本、鉄鋼以外の材料キャプセル10本、R I キャプセル9本、大学関係キャプセル6本、合計59本に達する。またR I 用のラビット照射を45回行った。

試験照射の終わったキャプセルはJ M T R ホットラボで解体後すべて東海研究所に送り、照射後試験はすべて東海研究所の好意により東海ホットラボにおいて実施した。

J M T R 運営委員会は昭和47年に廃止され、J M T R 利用協議会に改組されたので、利用小委員会も自動的に解散となり、改めてJ M T R 利用協議会の下に第1部会を設置し、この部会においてJ M T R 試用期間の照射結果の総括を行うことになった。第1部会はその下に燃料、鉄鋼、Z r その他材料、R I、大学の5グループを設け、各グループにおいて試用期間の照射結果のとりまとめを行った。

この報告はこれらの照射および照射後試験結果をまとめたものである。

ジルコニウム、その他の材料の試料作りは、早いものでは、昭和41年よりはじめられつまり数年前のことである。従って今日その結果を工業材料としてそのまま使用出来ぬものもある。ので、当時の試料作製の事情と今日の実用材料の作り方との違い、製造規模の違い、照射後試験の方法、精度等を承知してこれらのデータを利用して欲しい。

照射は全部で6キャプセルで、ジルカロイ2、ベリリウム1、制御材2、特殊材料1キャプセルで、制御材と特殊材料は無計測キャプセルである。

ジルコニウム合金は住友金属工業株式会社と株式会社神戸製鋼所が担当し、ジルカロイ-2とジルカロイ-4で、製造規模は数年前だがすでに、工業規模である、ただ管えの加工法は当時は抽伸法であり、加工度も約20%である、今は主に圧延法で作られ加工度は70~80%と大きく当時のものとは異なる。このため粒度はやや大で、再結晶温度が少し高く、540°C処理材が今日の480°Cぐらいに若干加工効果の残った、いわゆる1/4 H材的であり、今日の加工度であると、560°C焼鈍してすでに完全鈍しに近い。今日の実用材は、強さは540°C鈍し材並みで、伸びも大きく700°C鈍し材並である。硬さは $3\sim 5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の照射では30~40%増加した。

ベリリウムは日本碍子株式会社のもので、一部ベニチ社よりの輸入品である。溶解は2~4 kgでこれを圧延して板にしたものである。ベニチ社のものは、昭和30年代のおわりに話題になっていた、フランスのEL-4の630°C、 10^{21} n/cm^2 の使用条件を考えて、650°C、 10^{21} n/cm^2 照射して、ヘリウム損傷の程度を比較するつもりであったが、計画上600°C、 $8 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の照射条件になり、実際の照射の結果は540~550°C、 $3\sim 4.4 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ となってしまった。このため目立った寸法変化はなく、電子顕微鏡*)では、照射後加熱すると750~800°Cから泡が見られる。この点本当のヘリウム損傷の比較は不十分であったが、照射後加熱での検討はできた。

ベリリウム合金試料は、各種の元素を微量入れ照射効果をみたが、ヘリウム泡防止効果ははっきりわからなかった。ただ照射後加熱をし比較してみると、800°Cで粒界に泡の並ぶ様子には大差なかったが、バナジウムの化合物が泡をよくつかまえていることが目立った。ただ強さ試験の結果ではBe0.62%Cr合金はBe-Ca合金と殆ど同等の結果が得られたが更に多数の試験をしなければならぬであろう。

特殊材料および制御材料は、ステンレス鋼、アルミニウム等にボロンを添加したボロン入り合金、Ag-In-Cd合金などについて引張強さ、硬さ、金相試験をおこなった。B₄C粉末充填制御材、B₄C系にジルコニウム、黒鉛などを混合した混合粉末制御材では照射後ヘリウムガス分析、B¹⁰の分析を予定したが期間中にできなかった。希土類酸化物制御材では、ステンレス鋼に10w/oのSm₂O₃、Eu₂O₃またはGd₂O₃を加えたペレットの我が国最初の照射試験をおこなった。このほか、Nb-Zr、Nb-V、V-Ti合金およびインコネル-600の照射試験をおこなった。

大学関係の照射試験については、種々の基礎的な研究に係るものがおこなわれ、すでに照射

* 東大工学部原子力工学科でおこなわれた。

後試験の終了したものは、それぞれの機関において結果が発表されている。

R I 製造関係は、JMT 6 を使用して R I の製造をおこなうための予備実験が、製造を予定されている主要な元素について照射試験がおこなわれた。

IV Zr,制御材・その他の材料の
試用期間照射結果報告書

昭和四十九年 二月

JMTR利用協議会 Zr,制御材関係グループ

目 次

1	ジルコニウム合金の中性子照射効果	7
2	ジルコニウム-ニオブ合金の中性子照射	27
3	Be-Ca管およびBe合金板の機械的性質におよぼす照射効果について	33
4	天然ボロン入りアルミニウムの照射効果について	42
5	制御材(1w/o ボロン入りステンレス鋼)の照射試験結果について	49
6	制御材(Ag-In-Cd合金)の照射試験結果について	49
7	ステンレス鋼被覆B ₄ C制御棒の照射効果について	60
8	可燃性毒物棒(B ₄ C-Zry-2ペレット)の中性子照射について	62
9	B ¹⁰ のBurn upおよびB ₄ C充填試料の照射による寸法変化	66
10	特殊材料の中性子照射効果について	74
11	希土類酸化物ペレットの照射効果について	77
	照射キャプセル一覧	82

1 ジルコニウム合金の中性子照射効果

国内材料メーカー（株式会社神戸製鋼所，住友金属工業株式会社）から提供されたジルコニウム合金，ジルカロイ-2とジルカロイ-4の2種類の管，板および厚板についてJMTRを利用して照射試験および照射後試験を実施した。

提供された試験材の化学分析値をまとめて第1-1表に示す。管試験材の寸法はジルカロイ-2が14.480・D×0.92 tmm，ジルカロイ-4が10.720・D×0.62 tmmでいずれも引き抜き加工で製造されたものである。これは現在のジルカロイ燃料被覆管の製造法（管圧延法）とは異なっている。板試験材はジルカロイ-2，ジルカロイ-4いづれも板厚1 mmで，結晶粒度は2種類（標準粒と粗粒）である。シャルピー衝撃試験片とした厚板試験材は厚さ10 mmである。

これらの試験材から管引張試験片，板引張試験片（常温用および高温用の2種類），金相および硬さ試験片，シャルピー衝撃試験片等を加工製作した。各試験片の形状および寸法をまとめて第1-1図に示す。これらの試験片の最終熱処理条件は540 °Cの歪取り焼鈍（SR処理）と700 °Cの完全焼鈍（FA処理）の2条件である。

これらの試験片についての照射試験および照射後試験計画は第1-2表に示すように，試験温度，照射温度，照射量をパラメトリックに変えて，引張試験，硬さ試験，シャルピー衝撃試験，金相試験（金属組織，水素化物）を実施した。照射前試験は材料提供メーカーで，照射後試験は日本原子力研究所，東海（研）ホットラボラトリーで実施した。

各照射キャプセルに組込まれ照射された試料の結果はキャプセルおよび材質単位として次表にまとめた。更に照射前試験結果と照射後試験結果の対応を明確にするため各試料番号を記入し，積算中性子照射量もその試料の中心部，たとえば引張試験片では標点部の中央，として明記した。

中性子照射後の引張試験結果はジルカロイの種類，熱処理条件，試験片の形状を問わず0.2%耐力，引張強さは増加し，伸びの減少が認められた。ジルカロイ-2，ジルカロイ-4の機械的性質の中性子照射量依存性をそれぞれ第1-2図，第1-3図に示す。ジルカロイ-2とジルカロイ-4の相違はあまり認められなかった。540 °C歪取り焼鈍材（SR処理）では0.2%耐力，引張強さは照射前で45~50 kg/mm²，55~66 kg/mm²であったのが約10²¹ n/cm² (>1MeV)の照射により約50%増加して，それぞれ62~75 kg/mm²，65~80 kg/mm²になり，伸びは照射前に約20%程度であったものが約10%程度に減少した。700 °C完全焼鈍材（FA処理）の強度は540 °C歪取り焼鈍材と同じ傾向であった。700 °C焼鈍材の照射前の伸びは約35%であったが約10²¹ n/cm² (>1MeV)照射後には約20%に減少した。10²¹ n/cm² (>1MeV)程度中性子照射された後の延性には，照射前の傾向（700 °C焼鈍材の方が540 °C焼鈍材よりも大きな延性を示す。）が残されている。

ビッカース硬さは約10²¹ n/cm² (>1MeV)の中性子照射により，ジルカロイ-2，ジルカロイ-4，いづれも30~40増大し，引張試験における強度増加との対応が認められた。

金相試験の結果を写真1-1~写真1-4に示す。これらの結果から明らかなように，常光

および偏光による金属組織，水素化物の光学顕微鏡観察では約 10^{21} n/cm^2 ($>1\text{MeV}$) の照射による変化は認められなかった。

引張試験，硬さ試験などの強度試験結果から得られたことは前述したように，いずれの焼鈍材とも照射による延性低下が予期した程顕著でなかったことである。

今日の管圧延法では今回供試した試料の製造法にくらべてかなり加工度は大きく，加工度が大きい程管の延性は向上する。これは近年の原子炉用燃料被覆管で照射後も高延性を要求されることと関連して注目される。

シャルピー衝撃試験片は厚板試験材 ($t = 10\text{mm}$) から採集した J I S 4 号試験片である。ジルカロイ-2，ジルカロイ-4 の材質の相違，試料採集方向の相違等にもとづく試験結果は顕著な違いは認められなかった。中性子照射による吸収エネルギーの減少，脆性破面率の増加として現られる脆化現象は鉄鋼などの結果と同様である。試験温度の増加にともない脆化の程度は減少しているが， 300°C の試験温度においても照射材の吸収エネルギーが非照射材のそれにくらべて極めて小さいことは照射によって生じた欠陥が十分に回復していないためと考えられる。

以上の諸試験により，国産ジルコニウム合金の中性子照射効果について若干の知見を得ることが出来たことは非常に有意義であった。

第 1 - 1 表 試験材化学分析値

試験材		管試験材				板試験材				厚板試験材	
材質		Zry-2		Zry-4		Zry-2		Zry-4		Zry-2	Zry-4
		K	S	K	S	K	S	K	S	S	S
合金元素(w/o)	Sn	1.46	1.50	1.47	1.50	1.55	1.44	1.45	1.49		
	Fe	0.14	0.18	0.21	0.21	0.15	0.16	0.20	0.21		
	Cr	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09		
	Ni	0.06	0.07	0.0015	0.0010	0.06	0.06	0.0035	0.0010		
不純物元素 (ppm)	Al	29	52	25	49	31	47	46	52		
	B	0.2	<0.5	<0.2	<0.5	0.2	<0.5	<0.2	<0.5		
	C	130	50	100	70	160	50	130	50		
	Cd	<0.2	<0.5	<0.2	<0.5	<0.2	<0.5	<0.2	<0.5		
	Co	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
	Cu	14	10	14	10	<10	10	15	10		
	H	6	13	7	17	11	16	9	15		
	Hf	60	76	54	85	125	84	76	85		
	Mg	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
	Mn	<10	<10	<10	<10	<10	<10	10	10		
	Mo	<10	-	<10	-	-	-	-	-		
	N	59	20	40	22	40	24	72	24		
	Nb	<100	-	<100	-	-	-	-	-		
	O	1200	1280	1230	1200	1270	1220	1080	1180		
	Pb	<20	<10	<20	<10	<20	<10	<20	<10		
	Si	62	20	64	20	105	20	76	20		
	Ta	<200	-	<200	-	-	-	-	-		
	Ti	29	10	34	10	<15	10	20	10		
	V	<5	-	<5	-	-	-	-	-		
W	<25	<10	<25	<10	<25	<10	<25	<10			
U	<0.5	<3.5	<0.5	<3.5	<0.5	<3.5	<0.5	<3.5			

板試験材と同一

板試験材と同一

* 提供者 K: 株式会社神戸製鋼所
S: 住友金属工業株式会社

第1-2表 ジルコニウム合金照射試験内容

試験項目	試験材名	試験材種類		結晶粒度		試片採取方向		熱処理		照射後試験温度			目標照射条件		
		Zry-2	Zry-4	標準	粗	T	L	歪取り焼鈍	完全焼鈍	RT	150 °C	300 °C	RT	300 °C	照射量 (n/cm ²)
												RT	1×10 ²⁰	8×10 ²⁰	
引張試験	管	○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
		○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
		○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
		○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
引張試験	板	○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
		○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
		○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
		○	○	○		○	○	○	○	○			○		○
金相試験	管	○	○	○											
		○	○	○											
硬さ試験	管	○	○	○											
		○	○	○											
シャルピー試験	厚板	○	○	○											
		○	○	○		○									
		○	○	○		○									
		○	○	○		○									

* オートクレープ処理を施したものの

第1-3-1表 キャプセル番号67M-13G, 材質; Zry-4

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					
	—	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	備考
0224 0225	—	R.T.	45.6	65.5	20.0	36.3	SR540 °C×4h・管材
0226 0227	—	R.T.	51.7	69.4	17.5	—	SR540 °C×2h・管材
0228 0229	—	300	28.3	39.0	16.6	44.1	SR540 °C×4h・管材
0230 0231	—	300	27.1	34.2	14.5	—	SR540 °C×2h・管材
照射材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	速中性子照射量 n/cm ²	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
224	1.9×10^{20}	R.T.	71.0	78.3	13.6	—	SR540 °C×4h・管材
225	1.9×10^{20}	R.T.	68.9	78.3	7.0	—	SR540 °C×4h・管材
226	4.8×10^{20}	R.T.	73.6	85.2	11.6	—	SR540 °C×2h・管材
227	4.8×10^{20}	R.T.	76.2	85.2	11.2	—	SR540 °C×2h・管材
228	7.5×10^{20}	300	31.8	42.1	11.3	—	SR540 °C×4h・管材
229	7.5×10^{20}	300	31.0	41.8	13.7	—	SR540 °C×4h・管材
230	6.5×10^{20}	300	25.2	29.7	—	—	SR540 °C×2h・管材
231	6.5×10^{20}	300	28.9	39.8	17.4	—	SR540 °C×2h・管材

第1-3-2表 キャプセル番号67M-14G, 材質; Zry-2

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					
	—	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	備考
0209 0210	—	R.T.	35.8	56.0	26.9	34.1	FA700 °C×1h・管材
照射材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	速中性子照射量 n/cm ²	試験条件 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
209	4.5×10^{20}	R.T.	61.1	73.6	30.9	—	FA700 °C×1h・管材
210	7.1×10^{20}	R.T.	63.8	73.9	22.2	—	FA700 °C×1h・管材
211	8.2×10^{20}	R.T.	66.9	77.3	21.0	—	FA700 °C×1h・管材
212	5.4×10^{20}	R.T.	65.1	76.0	19.6	—	FA700 °C×1h・管材

第1-3-3表 キャプセル番号67M-15G, 材質; Zry-2

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					
	—	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	備考
0213 0214	—	R.T.	43.2	66.9	18.6	33.6	SR540 °C×4h, 管材
照射材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	速中性子照射量 n/cm ²	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
213	7.8×10^{20}	R.T.	66.4	77.6	15.6	—	SR540 °C×4h, 管材
214	5.6×10^{20}	R.T.	70.3	76.8	15.6	—	SR540 °C×4h, 管材

第1-3-4表 キャプセル番号67M-15G, 材質; Zry-4

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					
	—	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	備考
0232 0233	—	R.T.	35.2	55.8	26.8	40.6	FA700 °C×1h, 管材
0234 0235	—	R.T.	39.7	57.8	27.0	—	FA700 °C×1h, 管材
照射材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	速中性子照射量	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
232	3.0×10^{20}	R.T.	57.4	66.3	20.0	—	FA700 °C×1h, 管材
233	3.0×10^{20}	R.T.	57.9	66.6	20.0	—	FA700 °C×1h, 管材
234	6.1×10^{20}	R.T.	65.3	73.2	20.4	—	FA700 °C×1h, 管材
235	6.1×10^{20}	R.T.	64.2	72.1	18.0	—	FA700 °C×1h, 管材

第1-3-5表 キャプセル番号67M-16G, 材質: Zry-2

非 照 射 材							
試料番号	試験条件および結果						
	—	試験温度 °C	耐 力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	絞 り %	備 考
0244 0245	—	R.T.	50.8	59.5	20.0	51.5	SR540 °C×4h, 板材
0256 0257	—	R.T.	49.7	56.1	18.5	45.2	SR540 °C×4h, 板材
0258 0259	—	150	40.0	47.3	22.4	56.8	SR540 °C×4h, 板材
0248 0249	—	300	30.9	35.2	16.0	63.7	SR540 °C×4h, 板材
0252 0253	—	R.T.	40.5	50.6	29.2	56.0	FA700 °C×1h, 板材
0254 0255	—	R.T.	32.3	42.2	27.0	—	FA700 °C×1h, 板材
— —	—	300	14.9	25.4	24.5	—	FA700 °C×1h, 板材
照 射 材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	速中性子照射量 n/cm ²	試験温度 °C	耐 力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	絞 り %	試料処理条件, 試料形状
244	5.1×10^{20}	R.T.	75.0	85.0	4.6	—	SR540 °C×4h, 板材
245	5.1×10^{20}	R.T.	73.3	82.3	4.1	—	SR540 °C×4h, 板材
256	8.8×10^{20}	R.T.	72.5	74.7	4.8	—	SR540 °C×4h, 板材
257	8.8×10^{20}	R.T.	70.0	75.5	3.8	—	SR540 °C×4h, 板材
246	5.1×10^{20}	R.T.	80.0	80.0	7.4	—	SR540 °C×4h, 板材
247	5.1×10^{20}	R.T.	70.0	70.0	4.2	—	SR540 °C×4h, 板材
258	7.0×10^{20}	150	55.0	56.8	8.2	—	SR540 °C×4h, 板材
259	7.0×10^{20}	150	54.0	54.0	5.8	—	SR540 °C×4h, 板材
248	5.1×10^{20}	300	40.8	41.8	6.7	—	SR540 °C×4h, 板材
249	5.1×10^{20}	300	41.5	42.5	6.0	—	SR540 °C×4h, 板材
250	5.1×10^{20}	300	40.8	40.8	7.5	—	SR540 °C×4h, 板材
251	7.0×10^{20}	300	35.0	35.3	6.8	—	SR540 °C×4h, 板材
252	7.0×10^{20}	R.T.	68.0	70.3	12.4	—	FA700 °C×1h, 板材
253	7.0×10^{20}	R.T.	72.0	72.0	13.0	—	FA700 °C×1h, 板材
254	7.0×10^{20}	R.T.	60.0	63.3	9.4	—	FA700 °C×1h, 板材
255	7.0×10^{20}	R.T.	62.8	62.8	7.6	—	FA700 °C×1h, 板材
215	2.6×10^{20}	R.T.	70.3	78.1	11.4	—	SR540 °C×2h, 管材

第1-3-6表 キャプセル番号67M-16G, 材質; Zry-4

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					備考
	—	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
0260 0261	—	R.T.	46.0	56.9	19.5	50.8	SR540 °C×4h, 板材
0272 0273	—	R.T.	45.7	52.0	16.8	41.7	SR540 °C×4h, 板材
0274 0275	—	150	37.2	43.3	18.7	57.4	SR540 °C×4h, 板材
0264 0265	—	300	28.7	31.8	14.2	63.5	SR540 °C×4h, 板材
照射材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					試料処理条件, 試料形状
	速中性子照射量 n/cm ²	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
260	8.8×10^{20}	R.T.	70.8	74.5	3.7	—	SR540 °C×4h, 板材
261	8.8×10^{20}	R.T.	74.2	75.5	5.0	—	SR540 °C×4h, 板材
272	8.1×10^{20}	R.T.	66.7	70.3	3.4	—	SR540 °C×4h, 板材
273	8.1×10^{20}	R.T.	66.7	71.2	3.5	—	SR540 °C×4h, 板材
262	8.1×10^{20}	R.T.	68.3	70.8	3.8	—	SR540 °C×2h, 板材
263	8.1×10^{20}	R.T.	72.0	72.0	7.8	—	SR540 °C×2h, 板材
274	8.1×10^{20}	150	51.0	51.3	5.5	—	SR540 °C×4h, 板材
275	8.1×10^{20}	150	50.0	50.5	6.0	—	SR540 °C×4h, 板材
264	8.8×10^{20}	300	35.8	36.0	5.3	—	SR540 °C×4h, 板材
265	8.8×10^{20}	300	39.0	39.0	5.0	—	SR540 °C×4h, 板材
266	8.8×10^{20}	300	36.5	36.5	6.5	—	SR540 °C×2h, 板材
267	8.1×10^{20}	300	34.8	35.0	6.3	—	SR540 °C×2h, 板材

第1-3-7表 キャプセル番号67M-23G, 材質; Zry-2

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					備考
	—	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
0205 0206	—	300	29.5	40.2	15.3	35.1	SR540 °C×4h, 管材
0207 0208	—	300	14.9	25.4	24.5	—	SR540 °C×4h, 管材

照射材の結果は次頁へつづく。

照 射 材							
試料番号	照 射 条 件	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	速中性子照射量 n/cm^2	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	試料処理条件, 試料形状
205	3.1×10^{20}	300	25.3	39.1	22.2	—	SR540 °C×4h, 管材
206	5.6×10^{20}	300	19.8	35.7	—	—	SR540 °C×4h, 管材
207	7.5×10^{20}	300	30.2	40.1	10.5	—	SR540 °C×2h, 管材
208	6.4×10^{20}	300	32.8	41.4	10.2	—	SR540 °C×2h, 管材

第1-3-8表 キャプセル番号67M-24G, 材質; Zry-2

非 照 射 材							
試料番号	—	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	—	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	備 考
0216 0217	—	R.T.	43.2	66.9	18.6	33.6	SR540 °C×4h, 管材
0218 0219	—	R.T.	49.0	65.6	19.0	—	SR540 °C×2h, 管材
照 射 材							
試料番号	照 射 条 件	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	速中性子照射量 n/cm^2	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	試料処理条件, 試料形状
216	6.0×10^{19}	R.T.	試 験 不 能			—	SR540 °C×4h, 管材
217	6.0×10^{19}	R.T.	66.4	75.5	17.2	—	SR540 °C×4h, 管材
218	6.0×10^{19}	R.T.	67.7	78.7	14.8	—	SR540 °C×2h, 管材
219	6.0×10^{19}	R.T.	71.6	80.1	12.8	—	SR540 °C×2h, 管材

第1-3-9表 キャプセル番号67M-24G, 材質; Zry-4

非 照 射 材							
試料番号	—	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	—	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	備 考
0236 0237	—	R.T.	45.6	65.5	20.0	36.3	SR540 °C×4h, 管材
0238 0239	—	R.T.	36.8	56.3	37.6	—	SR540 °C×4h, 管材
	—	R.T.	28.6	48.2	41.6	—	SR540 °C×2h, 管材

照射材の結果は次頁へつづく。

照 射 材							
試料番号	照 射 条 件	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	速中性子照射量 n/cm^2	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	試料処理条件, 試料形状
236	6.0×10^{19}	R.T.	69.5	77.9	14.4	—	SR540 °C×4h, 管材
237	6.0×10^{19}	R.T.	68.9	77.9	13.2	—	SR540 °C×4h, 管材
238	6.0×10^{19}	R.T.	66.8	76.3	18.0	—	SR540 °C×4h, 管材
239	6.0×10^{19}	R.T.	72.6	82.1	9.8	—	SR540 °C×4h, 管材

第 1-3-10 表 キャプセル番号 67M-33G, 材質; Zry-2

非 照 射 材							
試料番号	—	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	—	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	備 考
$\bar{O}220$	—	R.T.	43.2	66.9	18.6	33.6	SR540 °C×4h, 管材
$\bar{O}221$	—	R.T.	43.2	66.9	18.6	33.6	SR540 °C×4h, 管材
$\bar{O}222$	—	R.T.	49.4	65.9	20.0	—	SR540 °C×2h, 管材
$\bar{O}223$	—	R.T.	49.4	65.9	20.0	—	SR540 °C×2h, 管材
$\bar{O}276$	—	R.T.	50.8	59.5	20.0	51.5	SR540 °C×4h, 板材
$\bar{O}277$	—	R.T.	50.8	59.5	20.0	51.5	SR540 °C×4h, 板材
$\bar{O}278$	—	R.T.	48.6	65.3	18.0	—	SR540 °C×2h, 板材
$\bar{O}279$	—	R.T.	48.6	65.3	18.0	—	SR540 °C×2h, 板材

照 射 材							
試料番号	照 射 条 件	試 験 条 件 お よ び 結 果					
	照射量 n/cm^2 / 照射温度 ℃	試験温度 ℃	耐 力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	試料処理条件, 試料形状
220	$6.8 \times 10^{19} / 265$	R.T.	72.1	85.3	13.5	—	SR540 °C×4h, 管材
221	$1.4 \times 10^{20} / 315$	R.T.	70.3	87.2	7.7	—	SR540 °C×4h, 管材
222	$1.5 \times 10^{20} / 335$	R.T.	78.1	89.3	6.6	—	SR540 °C×2h, 管材
223	$1.2 \times 10^{20} / 285$	R.T.	76.8	90.6	12.2	—	SR540 °C×2h, 管材
276	$1.2 \times 10^{20} / 285$	R.T.	64.2	78.7	2.8	—	SR540 °C×4h, 板材
277	$1.2 \times 10^{20} / 285$	R.T.	70.0	79.7	4.2	—	SR540 °C×4h, 板材
278	$1.2 \times 10^{20} / 285$	R.T.	63.3	70.0	4.5	—	SR540 °C×2h, 板材
279	$1.2 \times 10^{20} / 285$	R.T.	44.2	59.7	10.0	—	SR540 °C×2h, 板材

第1-3-11表 キャプセル番号67M-33G, 材質; Zry-4

非照射材								
試料番号	-	試験条件および結果					備考	
		試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %		
0240 0241	-	R.T.	45.6	65.5	20.0	36.2	SR540 °C×4h, 管材	
0242 0243	-	R.T.	52.1	70.4	18.0	-	SR540 °C×2h, 管材	
0280 0281	-	R.T.	46.0	56.7	19.5	50.8	SR540 °C×4h, 板材	
0282 0283	-	R.T.	51.2	68.4	17.0	-	SR540 °C×2h, 板材	
照射材								
試料番号	照射条件		試験条件および結果				試料処理条件, 試料形状	
	照射量 n/cm ²	照射温度 ℃	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %		絞り %
240	6.8×10 ¹⁹	265	R.T.	73.6	87.5	11.7	-	SR540 °C×4h, 管材
241	1.4×10 ²⁰	315	R.T.	73.6	92.0	9.5	-	SR540 °C×4h, 管材
242	1.5×10 ²⁰	335	R.T.	71.5	95.9	6.2	-	SR540 °C×2h, 管材
243	1.2×10 ²⁰	285	R.T.	80.5	94.1	10.2	-	SR540 °C×2h, 管材
280	1.2×10 ²⁰	285	R.T.	54.2	66.2	3.7	-	SR540 °C×4h, 板材
281	1.2×10 ²⁰	285	R.T.	44.2	62.3	6.2	-	SR540 °C×4h, 板材
282	1.2×10 ²⁰	285	R.T.	52.5	61.0	6.2	-	SR540 °C×2h, 板材
283	1.2×10 ²⁰	285	R.T.	50.5	64.5	7.0	-	SR540 °C×2h, 板材

第1-4-1表 キャプセル番号67M-15G, 材質; Zry-2, Zry-4

非照射材							
材質	試料番号	-	硬さHv	材質	試料番号	-	硬さHv
Zry-2	0183	-	192.4	Zry-4	0185	-	187.6
照射材							
材質	試料番号	照射量n/cm ²	硬さHv	材質	試料番号	照射量n/cm ²	硬さHv
Zry-2	183	7.0×10 ²⁰	220	Zry-4	185	4.7×10 ²⁰	224
Zry-2	184	4.4×10 ²⁰	233	Zry-4	186	4.7×10 ²⁰	230

1) 熱処理 SR540 °C×4h, 試料形状; 管材, 2) 試験荷重 5 kg, 3) 非照射材, 照射材とも条件すべて同じ。

第1-5-1表 キャプセル番号67M-24G, 材質: Zry-2

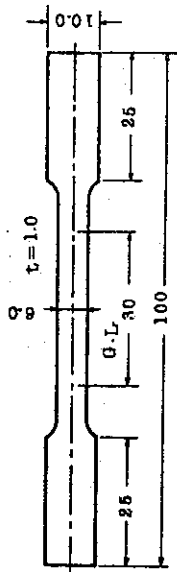
非照射材				データの記入方法 ; 吸収エネルギー (kg-m) / 脆性破面率 (%)			
試料番号	試験温度			試料番号	試験温度		
	20 °C	150 °C	300 °C		20 °C	150 °C	300 °C
L-1	3.9/60	5.0/25	21.0/0	T-1	1.7/75	5.0/25	21.4/7
L-2	3.6/60	4.8/25	22.1/0	T-2	1.3/75	5.0/25	21.5/0
注) 1. 試料処理条件 FA700 °C × 2h							
注) 2. 試料番号 L は圧延方向, T は圧延方向に対し直角方向より採取したもの							
照射材				データの記入方法 ; 吸収エネルギー (kg-m) / 脆性破面率 (%)			
試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度		試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度	
		19 °C				19 °C	
438	8.6 × 10 ¹⁹	1.5 / 100		487	1.54 × 10 ²⁰	1.7 / 100	
439	8.6 × 10 ¹⁹	1.5 / 100		488	1.60 × 10 ²⁰	1.8 / 100	
440	8.6 × 10 ¹⁹	1.7 / 100		489	1.60 × 10 ²⁰	1.75 / 100	
441	8.6 × 10 ¹⁹	1.75 / 100		490	1.60 × 10 ²⁰	1.7 / 100	
442	8.6 × 10 ¹⁹	1.5 / 100		491	1.60 × 10 ²⁰	1.75 / 100	
443	9.7 × 10 ¹⁹	1.7 / 100		496	1.58 × 10 ²⁰	1.75 / 100	
474	1.3 × 10 ²⁰	1.75 / 100		498	1.52 × 10 ²⁰	1.5 / 100	
475	1.3 × 10 ²⁰	1.65 / 100		499	1.52 × 10 ²⁰	1.7 / 100	
476	1.3 × 10 ²⁰	1.5 / 100		500	1.52 × 10 ²⁰	1.6 / 100	
477	1.35 × 10 ²⁰	1.75 / 100		501	1.52 × 10 ²⁰	1.45 / 100	
478	1.45 × 10 ²⁰	1.75 / 100		486	1.54 × 10 ²⁰	1.6 / 100	
479	1.45 × 10 ²⁰	1.65 / 100		497*	1.58 × 10 ²⁰	1.8 / 100	
試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度		試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度	
		150 °C				300 °C	
450	1.04 × 10 ²⁰	2.5 / 60		462	1.07 × 10 ²⁰	4.3 / 40	
451	1.04 × 10 ²⁰	2.7 / 60		463	1.0 × 10 ²⁰	4.0 / 40	
452	1.04 × 10 ²⁰	2.5 / 60		464	1.0 × 10 ²⁰	4.3 / 40	
453	1.08 × 10 ²⁰	2.5 / 60		465	1.0 × 10 ²⁰	4.3 / 40	
454	1.08 × 10 ²⁰	2.0 / 60		466	1.0 × 10 ²⁰	4.5 / 40	
455	1.08 × 10 ²⁰	2.8 / 60		467	1.0 × 10 ²⁰	4.3 / 40	

*印試料は圧延方向より採取した試料で, その他の試料はすべて圧延方向に対して直角方向より採取したものである。

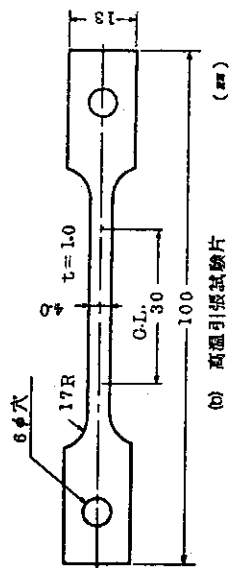
第1-5-2表 キャプセル番号67M-24G, 材質: Zry-4

非照射材				データの記入方法; 吸収エネルギー (kg-m) / 脆性破面率 (%)			
試料番号	試験温度			試料番号	試験温度		
	20 °C	150 °C	300 °C		20 °C	150 °C	300 °C
L-1	3.9/60	5.0/15	21.9/0	T-1	2.7/65	5.0/15	22.1/0
L-2	2.9/60	5.0/15	22.8/0	T-2	1.7/60	5.0/15	21.5/0
注) 1. 試料処理条件 FA700 °C × 2h							
注) 2. 試料番号Lは圧延方向, Tは圧延方向に対し直角方向より採取したもの							
照射材				データの記入方法; 吸収エネルギー# (kg-m) / 脆性破面率# (%)			
試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度		試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度	
		19 °C				19 °C	
444	9.7 × 10 ¹⁹	1.4 / 100		485	1.54 × 10 ²⁰	1.6 / 100	
445	9.7 × 10 ¹⁹	1.85 / 100		492	1.6 × 10 ²⁰	1.8 / 100	
446	9.7 × 10 ¹⁹	1.8 / 100		493	1.58 × 10 ²⁰	1.7 / 100	
447	9.7 × 10 ¹⁹	1.75 / 100		494	1.58 × 10 ²⁰	1.75 / 100	
448	1.04 × 10 ²⁰	1.5 / 100		495	1.58 × 10 ²⁰	1.9 / 100	
449	1.04 × 10 ²⁰	1.55 / 100		502	1.52 × 10 ²⁰	1.7 / 100	
480	1.45 × 10 ²⁰	1.6 / 100		503	1.4 × 10 ²⁰	1.5 / 100	
481	1.45 × 10 ²⁰	1.8 / 100		504	1.4 × 10 ²⁰	1.8 / 100	
482	1.45 × 10 ²⁰	1.7 / 100		505	1.4 × 10 ²⁰	1.75 / 100	
483	1.54 × 10 ²⁰	1.65 / 100		506	1.4 × 10 ²⁰	1.8 / 100	
484	1.54 × 10 ²⁰	1.7 / 100		507	1.4 × 10 ²⁰	1.8 / 100	
試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度		試料番号	照射量 n/cm ²	試験温度	
		150 °C				300 °C	
457	1.08 × 10 ²⁰	2.7 / 60		468	9.0 × 10 ¹⁹	4.9 / 40	
458	1.07 × 10 ²⁰	2.8 / 60		469	9.0 × 10 ¹⁹	4.6 / 40	
459	1.07 × 10 ²⁰	2.8 / 60		470	9.0 × 10 ¹⁹	4.5 / 40	
460	1.07 × 10 ²⁰	2.9 / 60		471	9.0 × 10 ¹⁹	5.0 / 40	
461	1.07 × 10 ²⁰	2.3 / 60		472	9.0 × 10 ¹⁹	4.5 / 40	
456*	1.08 × 10 ²⁰	2.8 / 60		473	1.3 × 10 ²⁰	4.5 / 40	

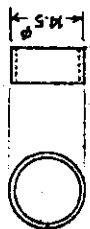
*印試料は圧延方向より採集した試料で, その他の試料はすべて圧延方向に対して直角方向より採集したものである。



(a) 常温引張試験片



(b) 高温引張試験片 (mm)



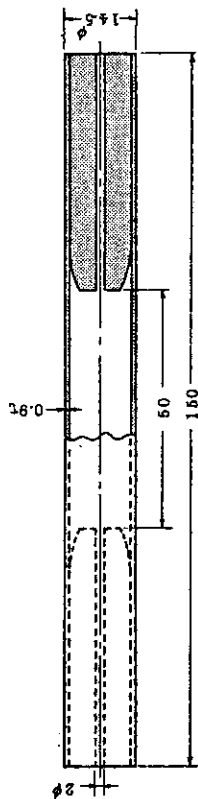
(a) シルカロイ-2



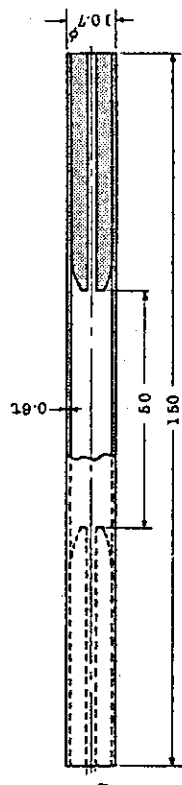
(b) シルカロイ-4 (mm)

(a) 金相及び硬さ試験片

(c) 板引張試験片

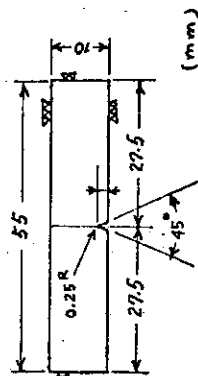


(a) シルカロイ-2



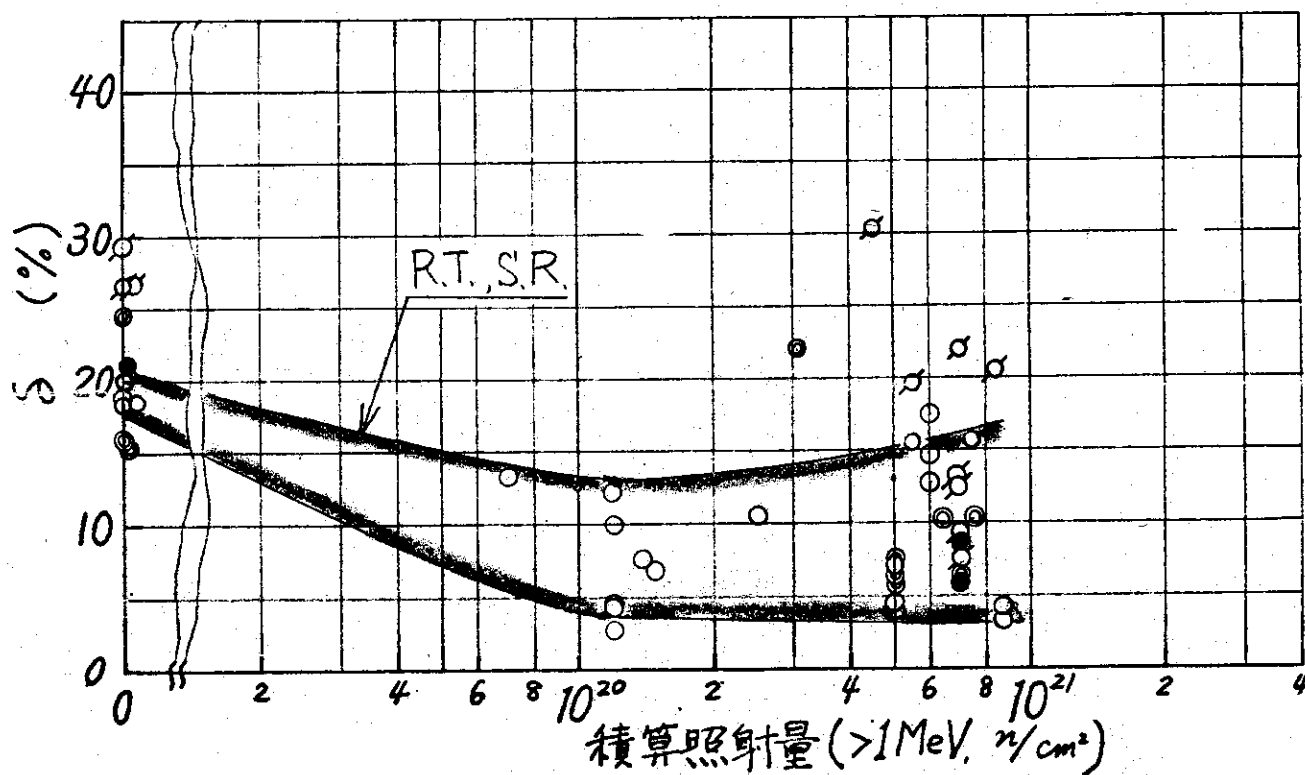
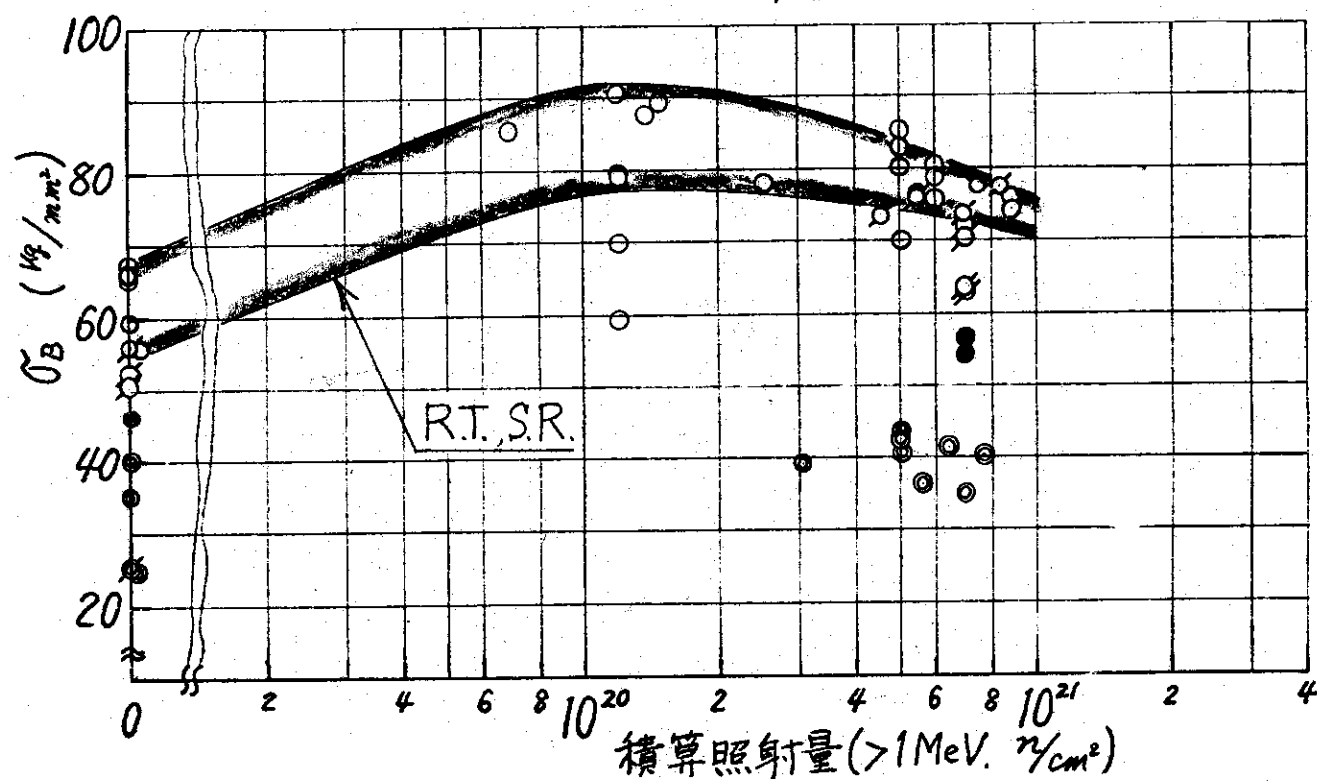
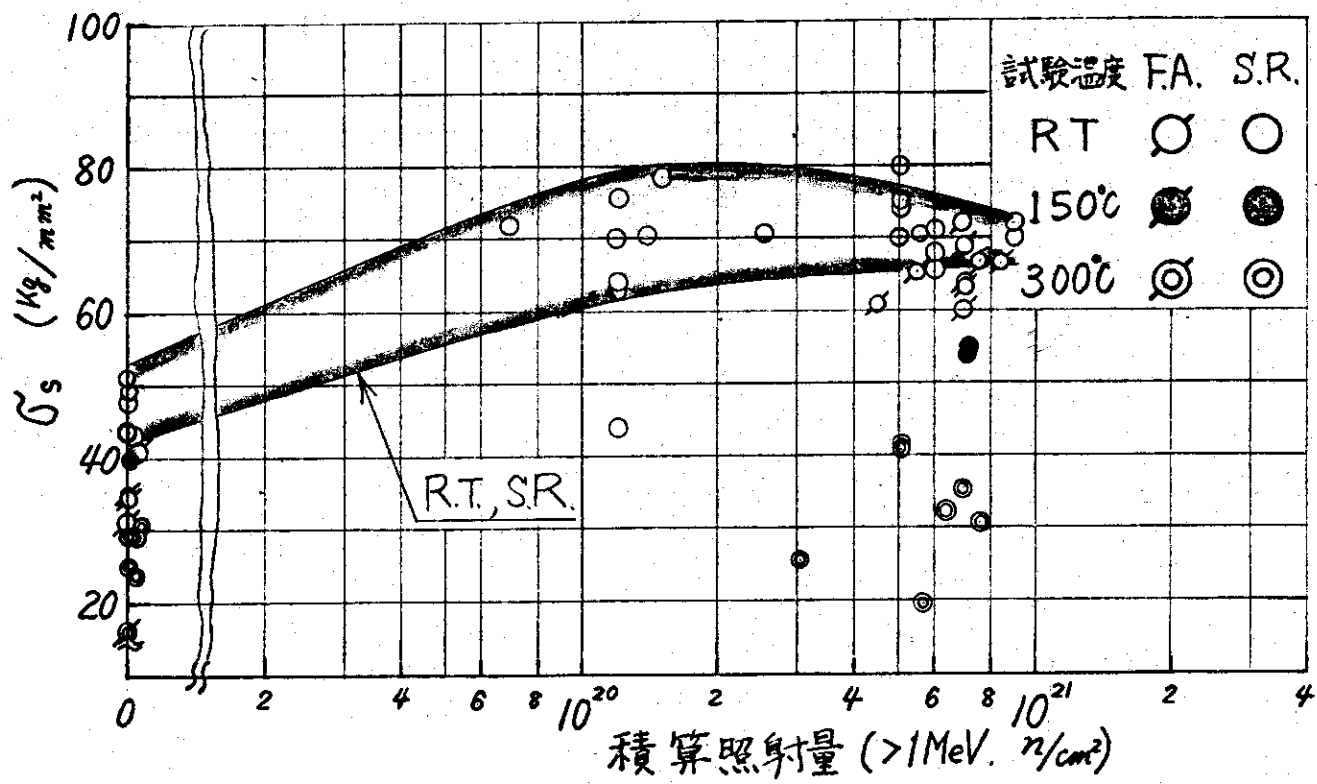
(b) シルカロイ-4 (mm)

(d) 管引張試験片

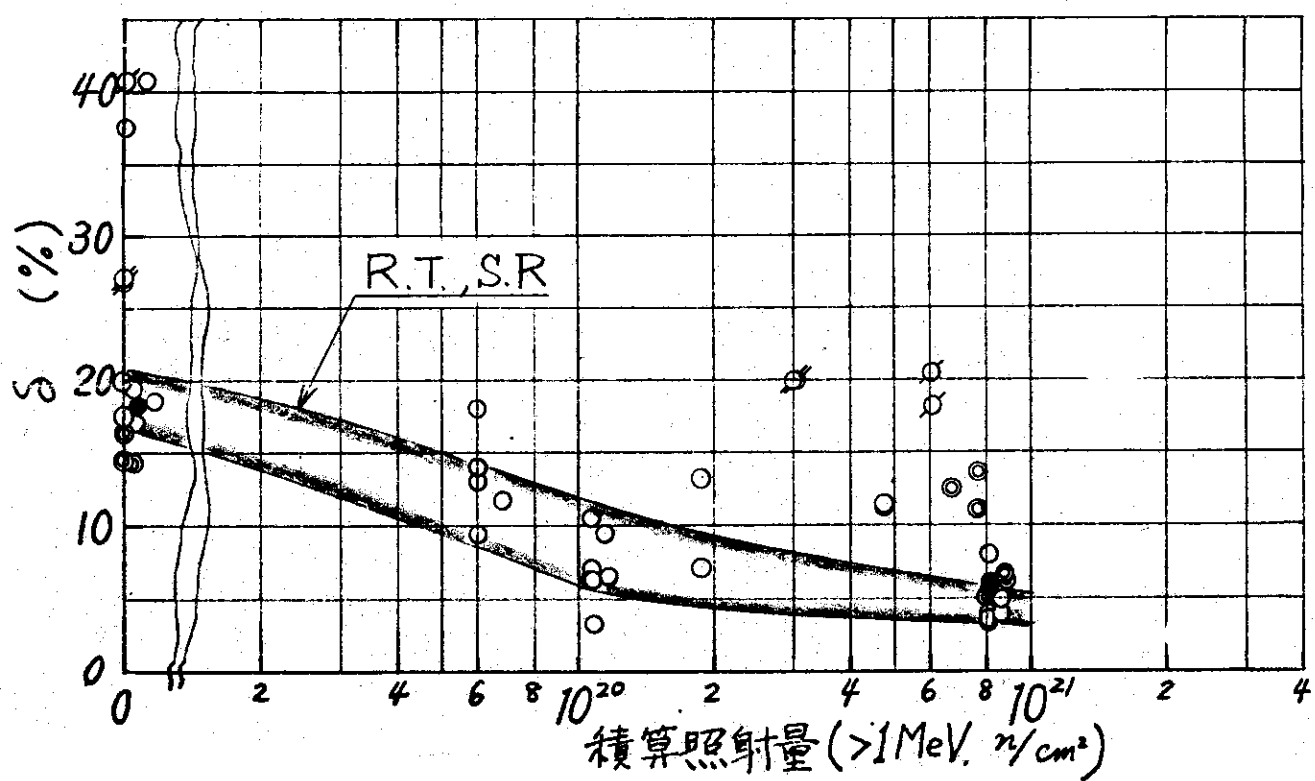
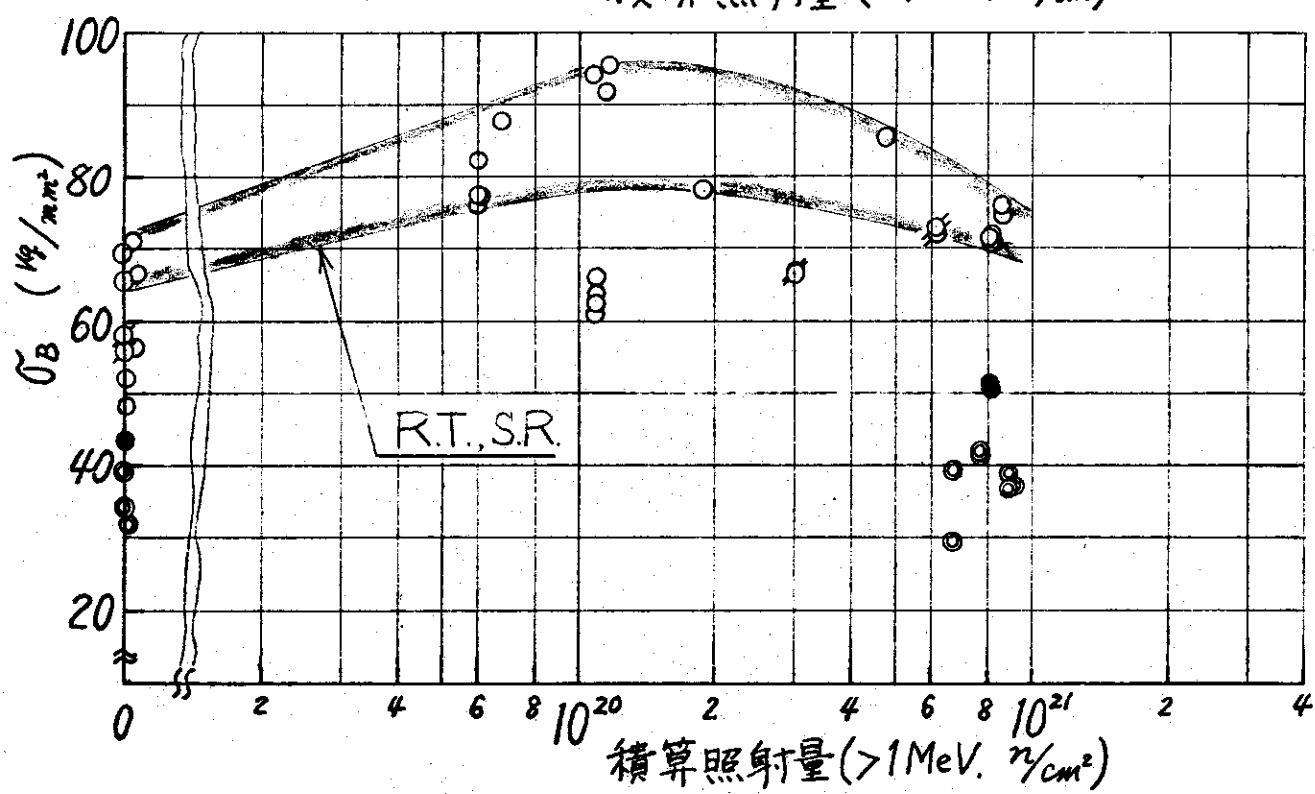
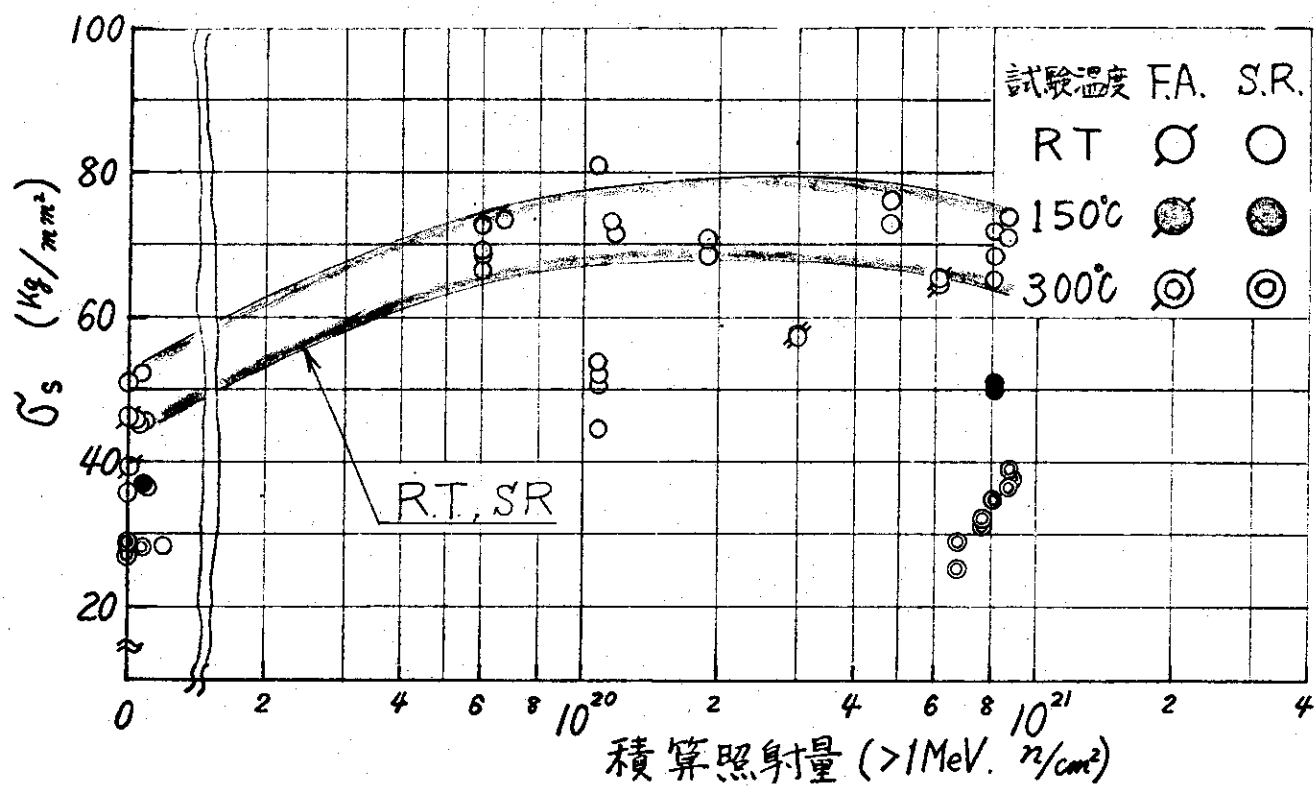


(b) シャルピー衝撃試験片(JIS4号)

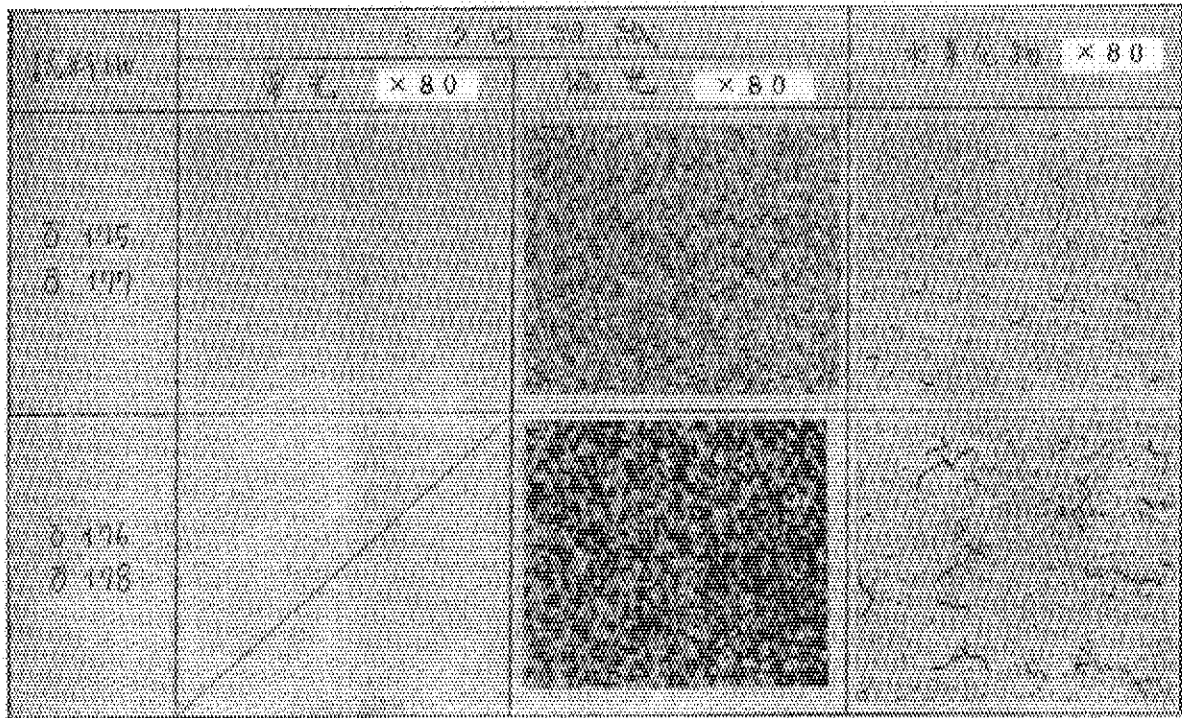
第1-1図 試験片形状



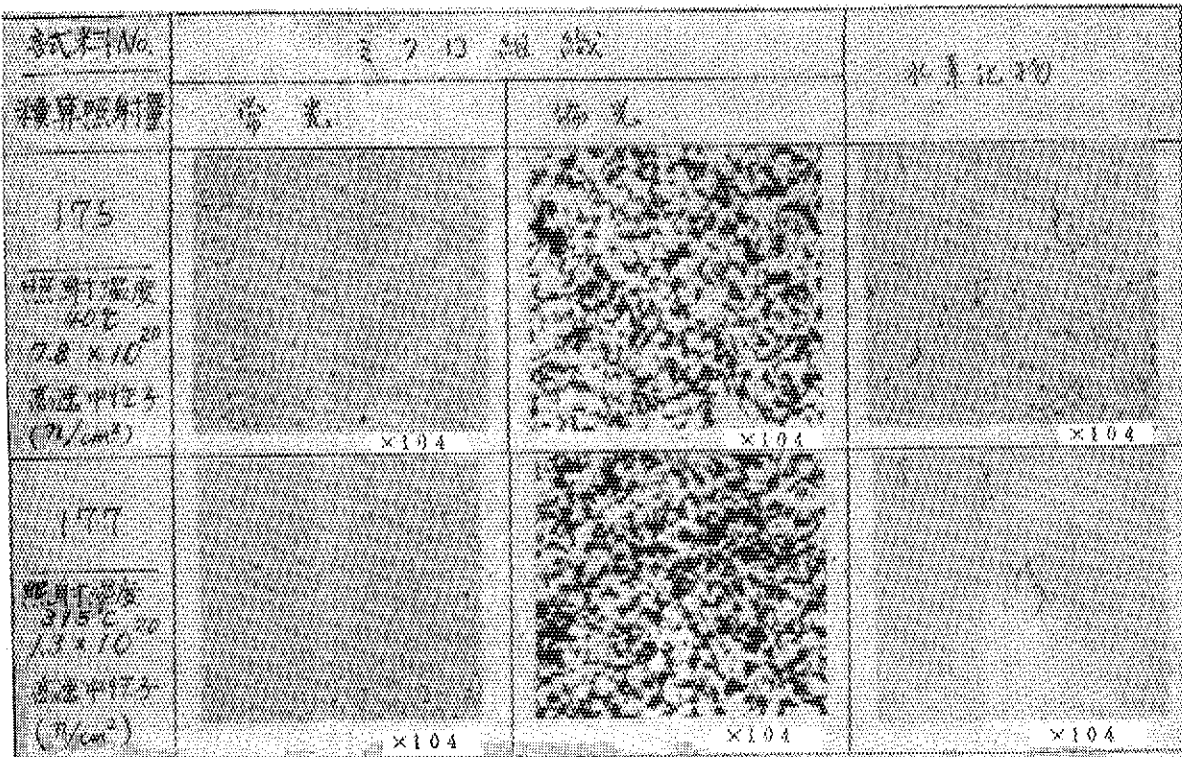
第1-2図 Zry-2 の中性子照射の影響



第1-3図 Zry-4 の中性子照射の影響



材質; Zry-2, 熱処理; 歪取り焼鈍
写真1-1 非照射材ミクロ組織および水素化物



材質; Zry-2, 熱処理; 歪取り焼鈍
写真1-2 照射材ミクロ組織および水素化物

試料No	ミクロ組織		水素化物 ×80
	常光 ×80	偏光 ×80	
179 181			
180 182			

材質；Zry-4，熱処理；歪取り焼鈍
 写真1-3 非照射ミクロ組織および水素化物

試料No	ミクロ組織		水素化物
	常光	偏光	
179 照射温度 40℃ 4.5×10^{20} 高速中性子 (γ/cm^2)			
181 照射温度 315℃ 1.3×10^{20} 高速中性子 (γ/cm^2)			

材質；Zry-4，熱処理；歪取り焼鈍
 写真1-4 照射材ミクロ組織および水素化物

2 ジルコニウム-ニオブ合金の中性子照射効果

本実験は2.5 w/o ニオブを含む、ジルコニウム-ニオブ合金について、照射前後の熱処理温度および照射温度等の機械的性質におよぼす影響をしらべた。

照射は3キャプセルで行ない、67M-17G, 67M-18Gでは照射温度40°C~50°C、高温照射を行った67M-42Gの照射温度は340°C~420°Cであった。

2.1 試料および熱処理

試験は室温における引張試験、硬さ試験を行った。引張試験の試験速度はひずみ速度3.0%/分(クロスヘッド速度1mm/分)で行った。照射前の熱処理は1000°C×30分の溶体化処理後、空冷および水冷とし、水冷材については500°Cにおいて5, 10, 25, 50, 100, 250, および275時間の時効処理を行なった。

この合金の実用的な溶体化処理温度は、 α 相と β 相の共存領域である880°Cとされているが、本実験では β -Nb相の析出が照射後の機械的性質におよぼす影響に着目したので β 相の1000°Cで溶体化処理を行った。

2.2 結果

2.2.1 照射前熱処理の影響

第2-1図に照射前の時効時間の照射後引張性質におよぼす影響を示す。非照射材の引張強さ(σ_b)は25時間でピークに達し、それ以後は減少している。0~10時間における低下は焼入れひずみの減少、25時間以後の低下は過時効によるものである。照射材の引張強さは約20kg/mm²増加しているがそのピークは非照射材の場合よりも短時間側に移行している。耐力(σ_s)も照射によって増加している。照射による伸び(ϵ)の低下は著しく、時効時間が50時間までは、その値はゼロに近い。これらの応力-歪曲線においては、耐力点直後に破断しているため、伸びはゼロに近くなっている。なお、空冷材の機械的性質(67M-42G)は、 $\sigma_b=94.3$ (非照射材59.3)、 $\sigma_s=92.7$ (42.5)、 $\epsilon=1.7$ (14.8)である。これ等の結果をまとめ第2-1表、第2-3表、第2-4表に示す。

以上のことからこの合金は短時間時効の場合には、照射による延性低下に注意すべきであることが明らかである。このことはこの合金が実用化するには非常に困難であることを意味する。何故ならこの合金は熱処理温度に敏感であり、前述したように本実験の熱処理温度は実用化の場合とは異なるからである。

2.2.2 照射温度の影響

高温照射の照射温度は340~420°Cである。照射前に500°Cで時効したものでは、0時間時効で $\sigma_b=107.0$ 、 $\sigma_s=94.6$ 、 $\epsilon=1.5$ 、10時間時効で $\sigma_b=91.0$ 、 $\sigma_s=74.0$ 、 $\epsilon=2.5$ 、25時間時効で $\sigma_b=91.0$ 、 $\sigma_s=77.0$ 、 $\epsilon=2.8$ となっている。また空冷材では $\sigma_b=82.0$ 、 $\sigma_s=67.7$ 、 $\epsilon=3.9$ である。これから照射温度が高くなると強度が低く、延性が高くなることかわかる。880°C水冷後500°C×25時間時効したZr-2.5w/oNb合金を50°Cで1.0

$\times 10^{20}$ n/cm² 照射して、照射後焼なましの影響を検討した Cupp¹⁾の結果によると、焼なまし温度が約 400 °C 以上で強度が低下し、500, 600 °C で強度の低下が著しい。

照射温度が 380 °C および 420 °C の引張試験の場合には、高温による照射欠陥の回復と時効硬化²⁾の両者が機械的性質に影響すると考えられるが、以上の結果は時効硬化よりも照射欠陥の回復による強度の低下の方が著しいことを示すものと考えられる。

2.2.3 照射後熱処理の影響

当初の計画では硬さ試験も含め、照射後熱処理の機械的性質におよぼす影響を調べ照射前の熱処理の結果と比較して詳細に検討する予定であったが諸般の事情によりこれに関する実験は中止せざるを得なくなった。これ等の照射後引張試験結果(第2-3表, 第2-4表)の試料処理条件が 1000 °C×30分, 水冷材および 1000 °C×30分, 空冷材となっている理由である。硬さ試験も同じである。硬さ試験の結果を第2-2表, 第2-5表に示す。

2.3 結 論

ジルコニウム-ニオブ合金の中性子照射効果と熱処理の影響について検討した結果、照射前の 1000 °C における溶体化処理、短時間時効の場合には照射による延性の低下をきたし、実用化は非常に困難であることが予想される。

引用文献

- 1) C. R. Cupp ; J. Nucl. Mater. 6 (1962), 241
- 2) 小川, 片野, 長崎 ; JAERI-memo 3313 (1968)

第2-1表 キャプセル番号67M-17G, 材質; Zr-2.5Nb合金

非照射材							
試料番号	—	試験条件および結果					備考
		試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
308~ 310相当	—	R. T.	39.5	98.5	5.3	—	1000℃×30min 水冷板材
314~ 316相当	—	R. T.	38.4	91.2	5.9	—	1000℃×30min水冷 500℃×5h時効板材
317~ 319相当	—	R. T.	42.2	89.8	6.8	—	1000℃×30min水冷 500℃×10h時効板材
323~ 325相当	—	R. T.	41.8	92.4	4.2	—	1000℃×30min水冷 500℃×50h時効板材
326~ 328相当	—	R. T.	44.8	85.3	3.7	—	1000℃×30min水冷 500℃×100h時効板材
329~ 331相当	—	R. T.	55.3	84.6	4.6	—	1000℃×30min水冷 500℃×275h時効板材
照射材							
試料番号	照射条件	試験温度 ℃	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
	熱中性子照射量 n/cm ²						
308	1.1×10^{21}	R. T.	91.0	93.0	1.7	—	1000℃×30min 板材
309	1.1×10^{21}	R. T.	90.0	91.6	2.0	—	
310	1.1×10^{21}	R. T.	97.0	98.4	1.3	—	
314	1.1×10^{21}	R. T.	—	122.0	—	—	1000℃×30min水冷 500℃×5h時効 板材
315	1.1×10^{21}	R. T.	—	121.0	—	—	
316	1.1×10^{21}	R. T.	—	132.4	—	—	
317	1.1×10^{21}	R. T.	—	122.0	—	—	1000℃×30min水冷 500℃×10h時効 板材
318	1.1×10^{21}	R. T.	—	120.0	—	—	
319	1.1×10^{21}	R. T.	—	129.0	—	—	
323	1.1×10^{21}	R. T.	—	116.0	—	—	1000℃×30min水冷 500℃×50h時効 板材
324	9.0×10^{20}	R. T.	—	119.0	—	—	
325	9.0×10^{20}	R. T.	—	123.0	—	—	
326	9.0×10^{20}	R. T.	106.0	117.0	0.7	—	1000℃×30min水冷 500℃×100h時効 板材
327	9.0×10^{20}	R. T.	—	110.6	—	—	
328	9.0×10^{20}	R. T.	103.0	113.0	0.7	—	
329	9.0×10^{20}	R. T.	106.0	117.0	0.7	—	1000℃×30min水冷 500℃×275h時効 板材
330	9.0×10^{20}	R. T.	98.0	111.6	1.0	—	
331	9.0×10^{20}	R. T.	98.0	109.0	0.7	—	
311	1.1×10^{21}	R. T.	—	97.0	—	—	
312	1.1×10^{21}	R. T.	—	111.0	—	—	
313	1.1×10^{21}	R. T.	—	117.0	—	—	
320	1.1×10^{21}	R. T.	—	129.0	—	—	
321	1.1×10^{21}	R. T.	—	135.0	—	—	
322	1.1×10^{21}	R. T.	—	112.0	—	—	

第2-2表 キャプセル番号67M-17G, 材質; Zr-2.5Nb合金

照 射 材					
試料番号	照射量 n/cm^2	硬さ Hv	試料番号	照射量 n/cm^2	硬さ Hv
A	※	317	F	※	282
B	※	270	G	※	260
C	※	324	H	※	266
D	※	313	K	※	267
E	※	314	O	※	264

※試料番号不明のため照射量の確定不能, 照射量は $7.0 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{20} n/cm^2$ の範囲である。

第2-3表 キャプセル番号67M-18G, 材質; Zr-2.5Nb合金

照 射 材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	熱中性子照射量 n/cm^2	試験温度 ℃	耐力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
287	7.1×10^{20}	R.T.	—	106.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
288	7.1×10^{20}	R.T.	—	91.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
289	7.1×10^{20}	R.T.	—	102.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
290	8.8×10^{20}	R.T.	—	99.5	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
291	8.8×10^{20}	R.T.	—	79.5	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
292	8.8×10^{20}	R.T.	—	92.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
293	8.8×10^{20}	R.T.	—	97.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
294	8.8×10^{20}	R.T.	90.0	100.0	1.1	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
295	8.8×10^{20}	R.T.	90.0	99.0	0.6	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
296	9.9×10^{20}	R.T.	—	105.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
297	9.9×10^{20}	R.T.	—	93.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
298	9.9×10^{20}	R.T.	—	92.5	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
299	9.9×10^{20}	R.T.	—	81.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
300	9.9×10^{20}	R.T.	—	108.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
301	9.9×10^{20}	R.T.	—	101.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
302	9.6×10^{20}	R.T.	—	109.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
303	9.6×10^{20}	R.T.	—	106.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
304	9.6×10^{20}	R.T.	83.0	97.0	0.9	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
305	9.6×10^{20}	R.T.	—	118.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材
306	9.6×10^{20}	R.T.	—	98.0	—	—	1000℃×30分, 水冷, 板材

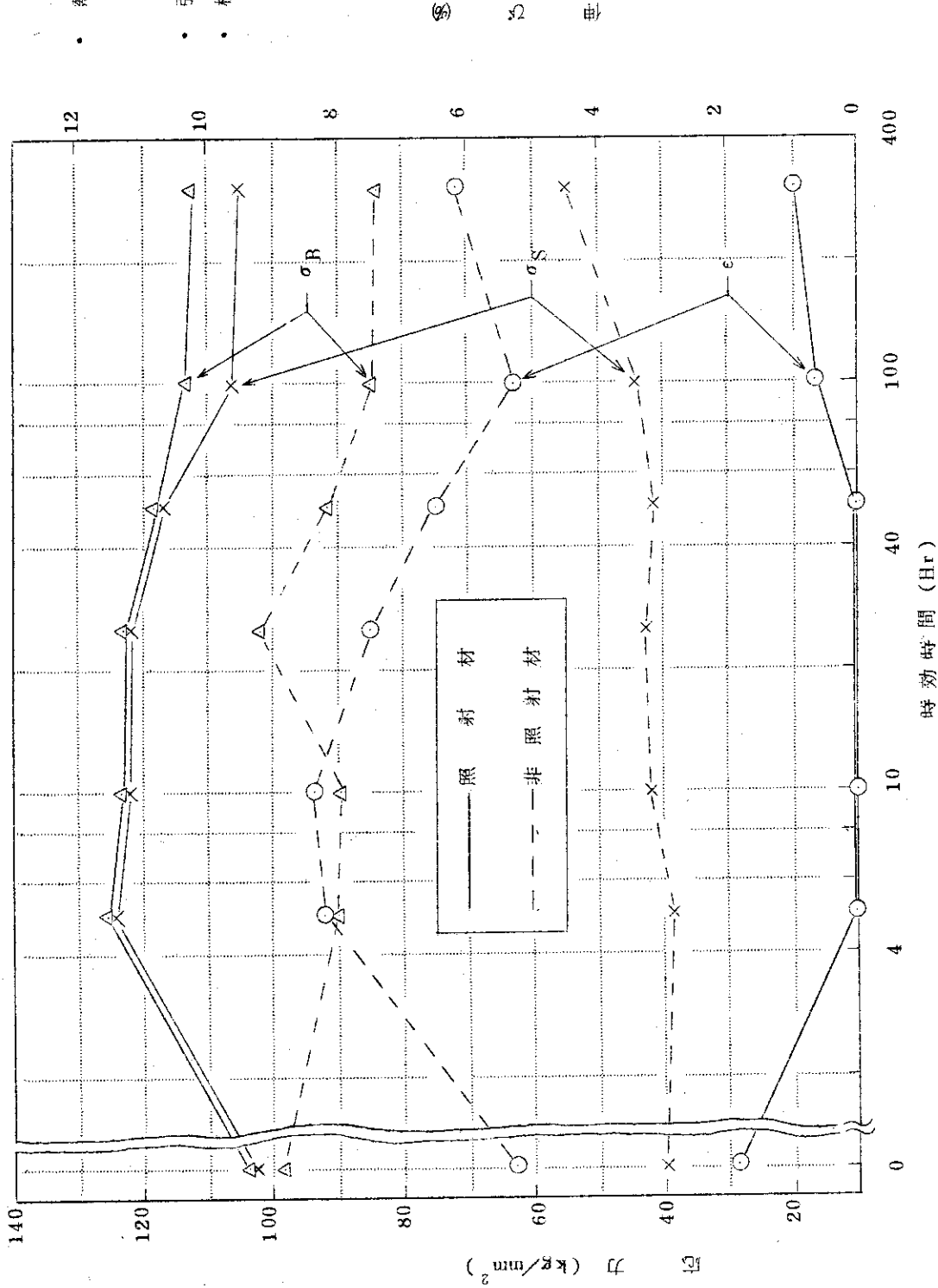
第2-4表 キャプセル番号67M-42G, 材質; Zr-2.5Nb合金

照 射 材							
試料番号	照射条件 照射量 n/cm^2 / 照射温度 °C	試験条件および結果					試料処理条件, 試料形状
		試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
332	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	68.4	82.6	3.5	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
333	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	55.6	71.0	0.4	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
334	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	67.0	81.4	4.2	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
335	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	90.0	104.0	0.9	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
336	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	92.0	105.6	1.4	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
337	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	—	91.0	—	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
338	$1.1 \times 10^{20} / 380$	R.T.	102.0	111.6	2.3	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
339	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	78.0	89.6	1.1	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
340	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	77.0	89.4	3.1	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
341	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	67.0	93.4	3.2	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
342	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	72.0	89.0	8.5	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
343	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	76.0	91.6	2.7	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
344	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	79.0	87.6	2.6	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材
345	$1.0 \times 10^{20} / 420$	R.T.	76.0	94.0	3.1	—	1000°C×30分, 水冷→空冷, 板材

第2-5表 キャプセル番号67M-42G, 材質; Zr-2.5Nb合金

照 射 材					
試料番号	照射量 n/cm^2 / 照射温度 °C	硬さ Hv	試料番号	照射量 n/cm^2 / 照射温度 °C	硬さ Hv
217	$1.2 \times 10^{20} / 340$	312	225	$1.4 \times 10^{20} / 340$	311
218	$1.2 \times 10^{20} / 340$	297	228	$1.4 \times 10^{20} / 340$	320
219	$1.2 \times 10^{20} / 340$	342	237	$1.3 \times 10^{20} / 340$	315
222	$1.3 \times 10^{20} / 340$	270	223	$1.3 \times 10^{20} / 340$	255
224	$1.3 \times 10^{20} / 340$	297			

- 熱処理条件
1000 °C 30分 水冷
500 °C 時効処理
- 引張試験温度; 室温
- 横算速中性子照射量;
 $9.0 \times 10^{20} \sim 1.1 \times 10^{21}$
n/cm²



第2-1図 Zr-2.5w/oNb合金の照射後引張性質におよぼす熱処理の影響

3 Be-Ca 管および Be 合金板の機械的性質におよぼす 照射効果について (キャプセル番号 67M-1G)

高温ガス冷却炉の燃料被覆材として Be を使用する場合、高温照射による損傷がまず問題である。本試験では燃料被覆材としての Be-Ca 管の機械的性質におよぼす高温照射の影響と耐ヘリウム損傷改善のために Be に Ce, Cr, Cu, Mo, Nb, Ti, V, Y, Zr, を微量添加した合金板の機械的性質におよぼす高温照射の影響について調べた。

Be 燃料被覆材としての照射は照射温度 650 °C, 照射量 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ を希望した。照射計画では照射温度 600 °C と変更したが照射実績は Be-Ca 管 (Pechiney 製および NKG 製) で照射温度 540 °C ~ 550 °C, 積算照射量 $6.1 \times 10^{20} \sim 6.8 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (高速中性子, 1MeV) であった。この様な照射実績の結果、非照射材にくらべ試験温度室温では 0.2% 耐力が 15% 増加し、伸びが約 50% 減少、試験温度 600 °C では引張強さが約 20% 増加、0.2% 耐力が約 50% 増加したが伸びは 90% 減少した。(第 3-1 図)

合金元素微量添加による耐ヘリウム損傷改善には Cr のみ有効で Be-0.62%Cr 合金は照射温度 560 °C, 積算照射量 $7.7 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の照射で室温の 0.2% 耐力と引張強さは、非照射材にくらべ、若干増加するが伸びは 5 倍に増し、試験温度 600 °C の高温でも 0.2% 耐力、引張強さは増加するが、伸び約 6.4% を保持した。ただし、伸びの値はクロスヘッド変位量での算出であるので絶対値については問題があるが Cr を入れた合金は照射後も最も延性に富む合金であることがわかった。

写真 3-1 ~ 3-10 に照射後の金相写真を示す。金相組織の観察では非照射材にくらべ、中性子照射による影響は見られなかった。

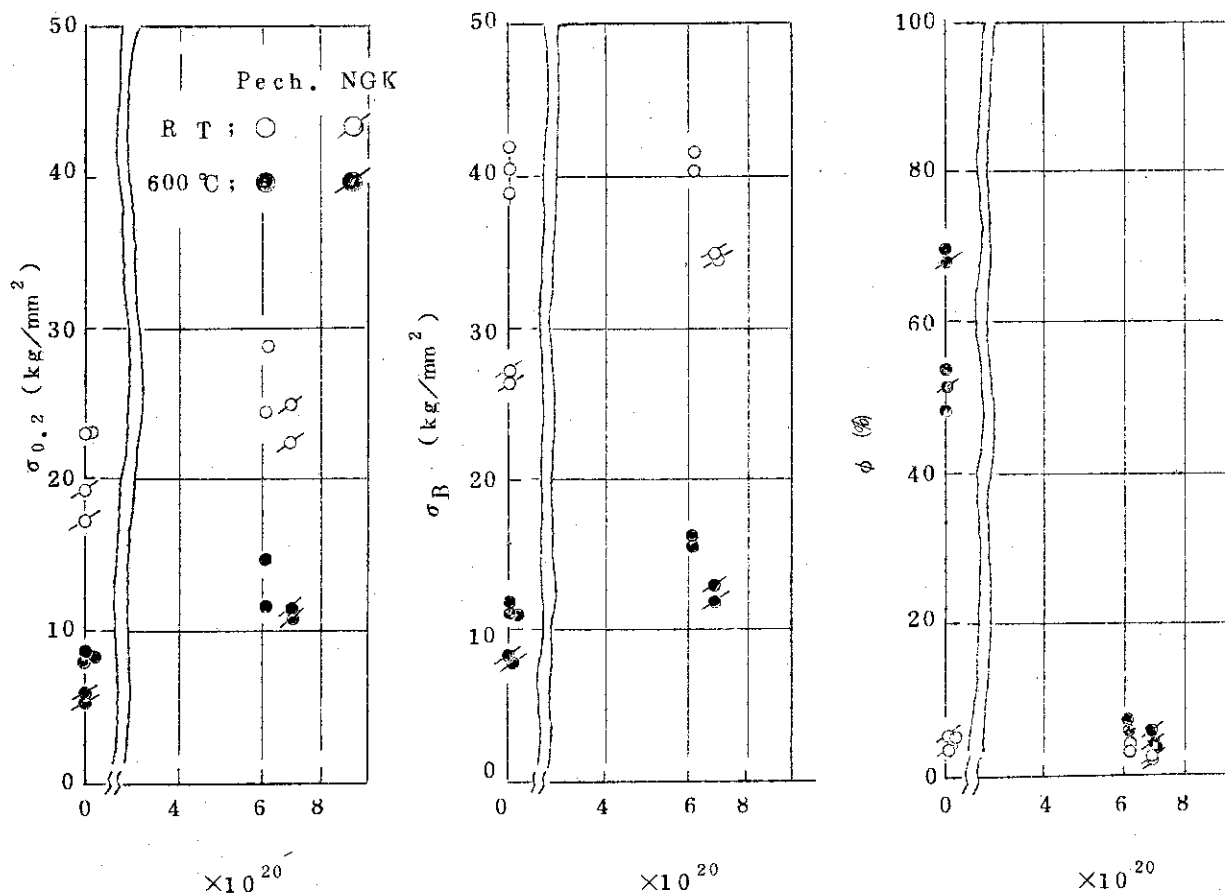
非照射材、照射材の引張試験の結果を積算照射量、照射温度とともに第 3-1 表に示す。

第3-1表 キャプセル番号67M-1G, 材質; Be, Be合金

非照射材					
試料番号	試験条件および結果				
	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	合金元素含有量, 試料条件等
○3	R.T.	16.9	25.4	3.4	0.8%Cu, 板材
○3		17.5	24.8	2.9	
○3	600	5.7	8.8	22.4	
○3		6.9	9.6	25.0	
○4	R.T.	26.2	34.9	2.4	0.63%Ti, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○4		21.6	27.2	1.9	
○4	600	6.7	6.9	44.0	
○5	R.T.	18.2	32.8	5.5	1.12%Nb, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○5		18.1	29.0	4.8	
○5	600	4.7	5.2	52.7	
○6	R.T.	17.4	22.1	2.0	0.66%V, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○6		16.7	21.0	1.8	
○6	600	4.2	4.6	56.0	
○8	R.T.	19.2	34.0	6.2	0.62%Cr, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○8		19.3	34.9	6.8	
○8	600	7.7	9.3	63.1	
○10	R.T.	14.8	20.3	2.3	1.0%Zr, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○10		15.8	21.9	2.4	
○10	600	3.7	4.2	53.5	
○12	R.T.	17.1	26.4	3.6	0.31%Y, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○12		18.2	26.3	3.4	
○12	600	4.4	4.6	47.3	
○12		3.8	4.1	60.3	
○7	R.T.	16.7	21.1	2.0	0.34%Mo, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○7		17.1	22.7	2.6	
○7	600	4.1	4.4	63.3	
○13	R.T.	16.3	21.0	1.7	1.27%Ce, 板材 熱処理 600 °C×500 h
○13		17.1	23.1	2.3	
○13	600	4.0	4.4	35.2	
○13		4.5	4.9	43.8	
○1	R.T.	23.8	34.7	3.41	板材 熱処理 700 °C×3h, 板材
○1		25.4	36.2	3.34	
○1	600	4.7	7.8	21.9	
Pechiney 社製 Be	R.T.	24.4	43.4	5.2	八ッ橋形試料
		25.0	42.5	4.6	
		23.3	41.7	5.2	
	600	9.1	12.8	60.1	
		7.4	11.3	65.7	
		8.8	12.9	64.6	
	R.T.	23.2	41.9	5.1	八ッ橋形試料 熱処理 600 °C×500 h
		23.3	40.5	5.2	
23.2		38.9	3.4		
600	8.8	11.9	48.8		
	8.0	11.2	53.2		
	8.2	11.6	70.0		
NGK 社製 Be	R.T.	18.1	34.9	4.7	八ッ橋形試料
	600	6.3	10.8	53.6	
	R.T.	17.4	26.4	3.4	八ッ橋形試料 熱処理 600 °C×500 h
		19.4	37.1	5.1	
	600	5.3	7.8	52.0	
		5.6	8.3	68.4	

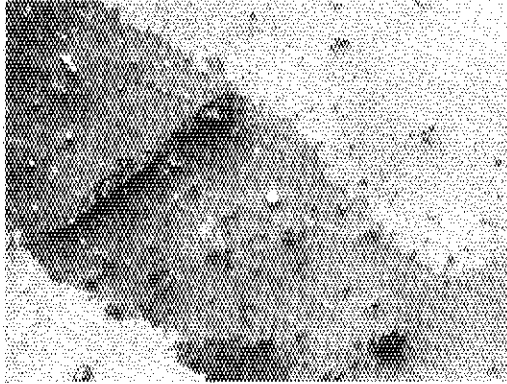
照射材の結果は次頁へつづく。

照 射 材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					
	照射量 / °C n/cm ² / 照射温度	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	絞 り %	合金元素含有量, 試料形状
3	8.1×10 ²⁰ /530	R.T.	18.7	23.2	0.9	—	0.8w/o Cu, 板状
3	8.1×10 ²⁰ /550	600	6.8	7.3	0.3	—	0.8w/o Cu, 板状
4	7.7×10 ²⁰ /560	R.T.	26.2	31.2	1.3	—	0.63w/o Ti, 板状
4	7.7×10 ²⁰ /530	600	10.4	12.2	1.5	—	0.63w/o Ti, 板状
5	7.7×10 ²⁰ /560	R.T.	22.3	31.3	3.5	—	1.12w/o Nb, 板状
5	7.7×10 ²⁰ /560	600	6.6	9.8	2.1	—	1.12w/o Nb, 板状
6	7.7×10 ²⁰ /560	R.T.	18.1	21.1	0.6	—	0.66w/o V, 板状
6	7.7×10 ²⁰ /560	600	8.3	8.9	2.1	—	0.66w/o V, 板状
8	7.7×10 ²⁰ /560	R.T.	12.3	32.6	31.0	—	0.62w/o Cr, 板状
8	7.7×10 ²⁰ /560	600	10.5	11.5	6.4	—	0.62w/o Cr, 板状
10	7.7×10 ²⁰ /560	R.T.	—	21.0	—	—	1.0 w/o Zr, 板状
10	7.7×10 ²⁰ /560	600	8.1	8.3	0.2	—	1.0 w/o Zr, 板状
12	7.7×10 ²⁰ /560	R.T.	—	19.6	—	—	0.31w/o Y, 板状
12	7.7×10 ²⁰ /560	600	—	7.6	—	—	0.31w/o Y, 板状
7	7.7×10 ²⁰ /560	600	8.7	9.3	0.5	—	0.34w/o Mo, 板状
13	7.7×10 ²⁰ /560	600	7.9	10.5	1.1	—	12.7w/o Ce, 板状
1	8.1×10 ²⁰ /580	600	7.8	8.0	0.2	—	純Be, 板状
346	6.1×10 ²⁰ /540	R.T.	28.9	40.3	2.6	—	Pechiney社製Be 八ヶ橋形試料
347	6.1×10 ²⁰ /540	R.T.	24.4	41.5	3.8	—	
348	6.1×10 ²⁰ /540	600	14.7	16.1	6.6	—	
349	6.1×10 ²⁰ /540	600	11.6	15.5	5.3	—	
352	6.8×10 ²⁰ /550	R.T.	22.5	34.3	2.4	—	NGK社製Be 八ヶ橋形試料
353	6.8×10 ²⁰ /550	R.T.	25.0	34.5	2.3	—	
354	6.8×10 ²⁰ /550	600	11.3	13.0	5.4	—	
355	6.8×10 ²⁰ /550	600	10.6	12.0	3.8	—	

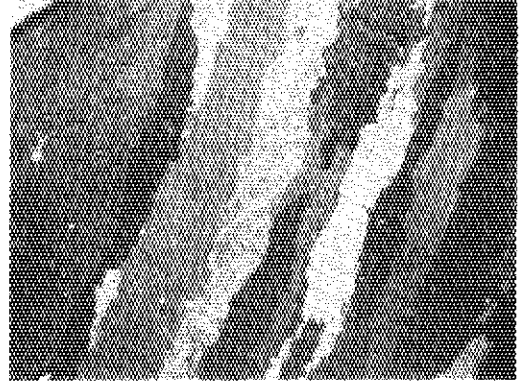


積算速中性子照射量 ($>1\text{MeV, n/cm}^2$)

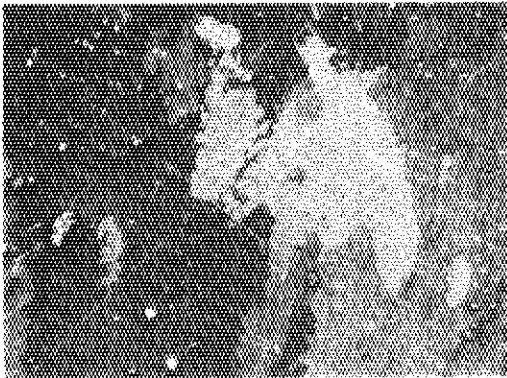
第3-1図 キャプセル番号6.7M-1G, 引張試験結果



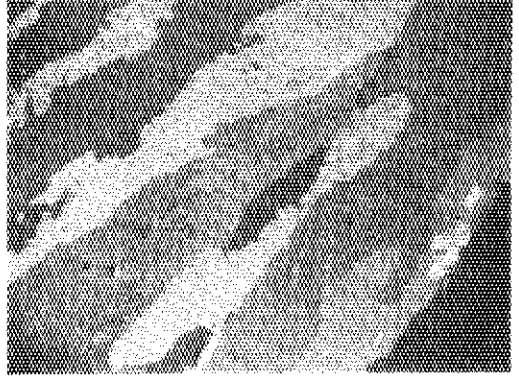
(a) AS Cast, 外周部 ×79



(a) AS Cast, 外周部 ×79



(b) AS Cast, 中間部 ×79



(b) AS Cast, 中間部 ×79

写真3-1 3.0%V-Be合金

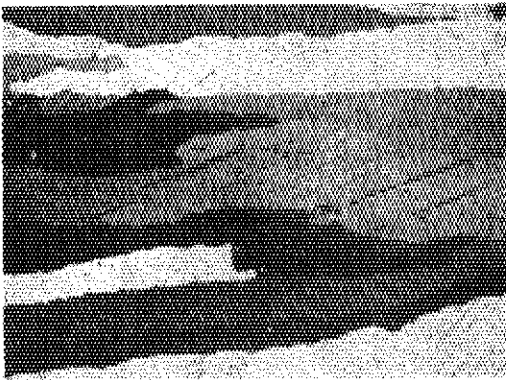
写真3-2 3.0%Mo-Be合金



(a) A S Cast, 外周部 × 79



(a) A S Cast, 外周部 × 79



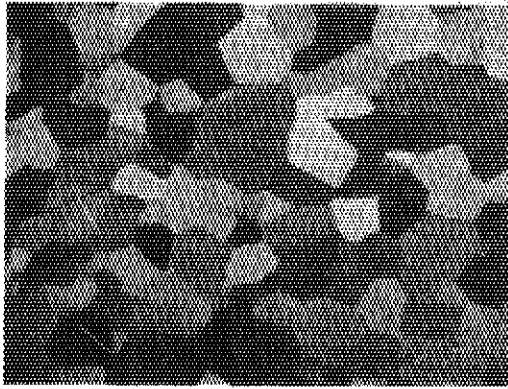
(b) A S Cast, 中間部 × 79



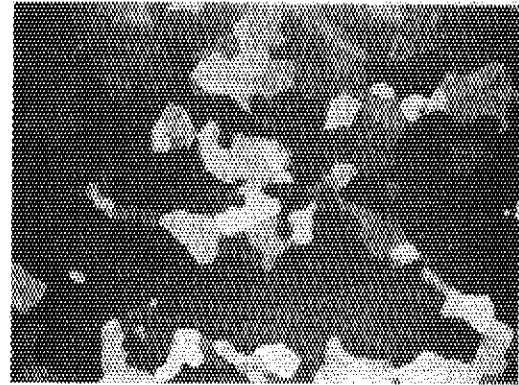
(b) A S Cast, 中心部 × 79

写真 3-3 4% Nb-Be 合金

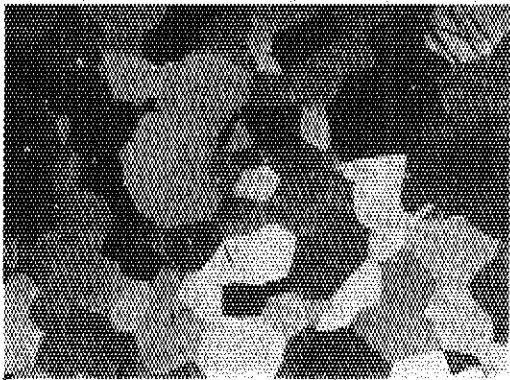
写真 3-4 2% Ti-Be 合金



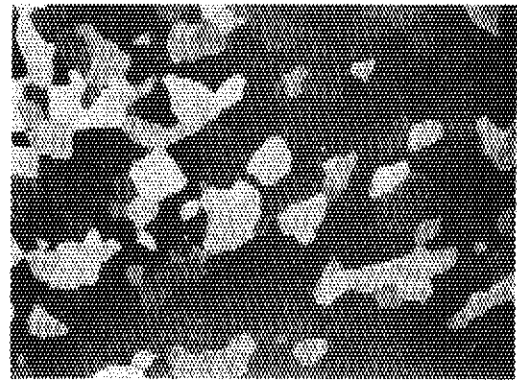
(a) 押出→700°C×3Hr熱処理 ×39
外周部



(a) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×32
外周部



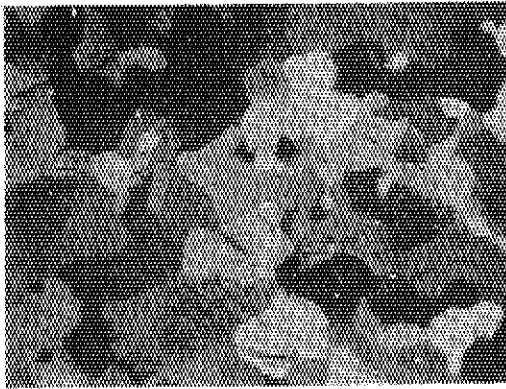
(b) 押出→700°C×3Hr熱処理 ×39
中心部



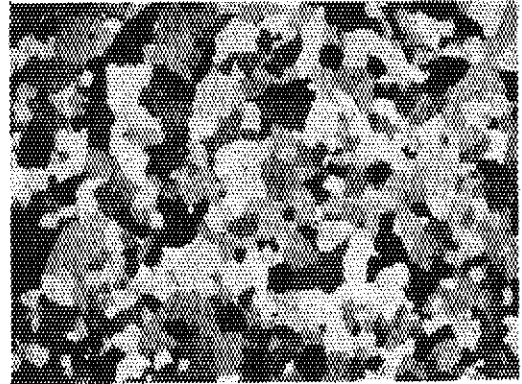
(b) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×32
中心部

写真3-5 純ベリリウム

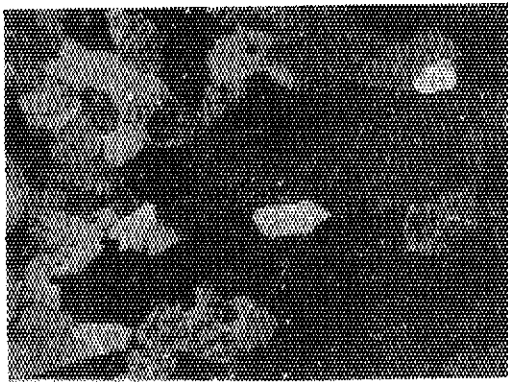
写真3-6 0.62% Cr-Be合金



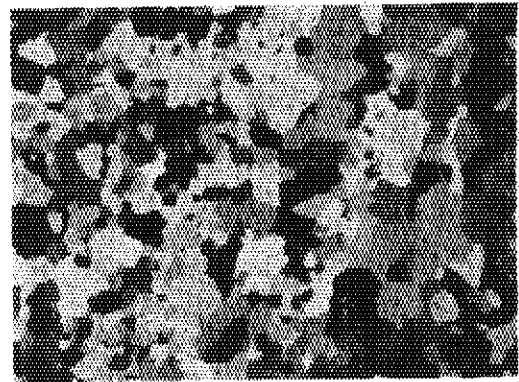
(a) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×79
外周部



(a) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×79
外周部



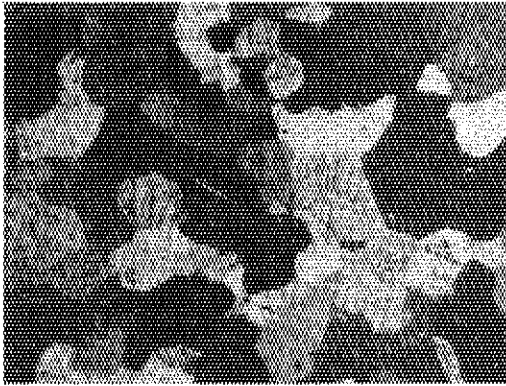
(b) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×79
中心部



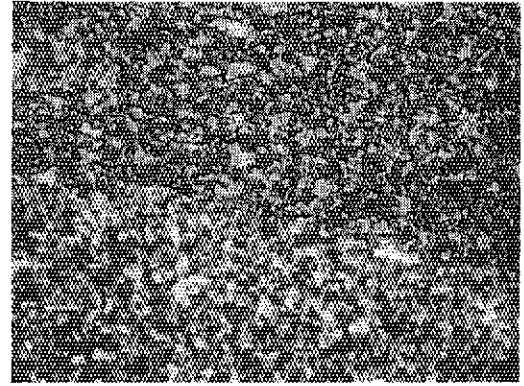
(b) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×79
中心部

写真3-7 1.0% Zr-Be合金

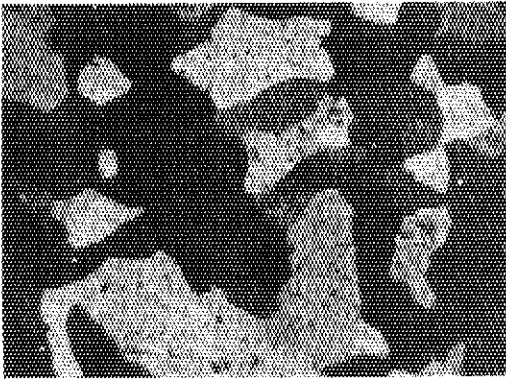
写真3-8 0.8% Cu-Be合金



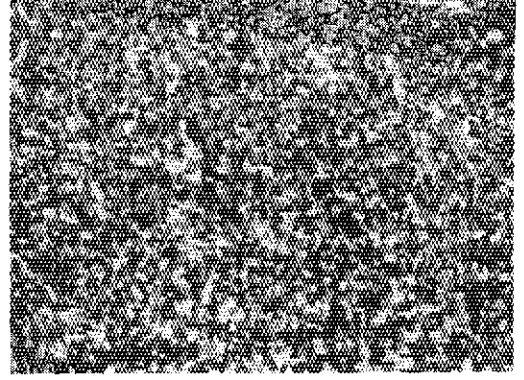
(a) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×79
中間部



(a) ホットプレス押出材 ×126
外周部



(b) 押出→800°C×3Hr熱処理 ×79
中心部



(b) ホットプレス押出材 ×126
中心部

写真3-9 0.8%Ca-Be合金

写真3-10 ベリリウム

4 天然ボロン入りアルミニウムの照射効果について (キャプセル番号67M-21G)

バーナブルポイズンとしてボロンを加えた板状燃料の被覆板および側板の照射挙動を評価するため、0.2~0.3w/oの天然ボロン入りアルミニウム板を照射に供した。

供試試料の化学成分を第4-1表に示す。

各試料の外観写真を写真4-1~写真4-3に、引張強さ、および硬さの照射後試験結果を第4-2表、および第4-3表に示す。ボロン量に対する0.2%耐力、および引張強度の関係は明らかでないが、伸びはボロン量に対して増加の傾向にある。引張試料の積算照射量はほぼ計画通りの $1.2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 、硬さ試料は非常にすくなく $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ であった。

寸法測定を試料はボロン含有量0.2%の試料番号146についてのみ照射後測定をしているのでこれを第4-4表に示す。

これ等の結果より全長および巾の変化はなく、厚さが約5%減少しているが理由は明らかでない。

金相組織の観察の結果、ボロン化合物は黒い針状または斑点状の状態をしており、形状、大きさ、量および分布とも照射前後において特に異なる点は認められなかった。非照射材の金相組織写真を写真4-4~4-5に示し、照射後の金相組織写真を写真4-6-a~4-6-dに示す。又、写真4-7-a~4-7-dは同一試料を弗酸、塩酸溶液で粒界腐食したものである。これよりボロン化合物は粒界、粒内の別なく一様に分散していることがわかる。この傾向はボロン量の相異によってもほとんど変わらない。

第4-1表 供試試料および化学成分

B量(%)	試料番号			合金成分				不純分		
	寸法用	引張用	硬さ金相	B (%)	Cr (ppm)	Mg (ppm)	Al	Cd (ppm)	Co (ppm)	U (ppm)
0.2	146	187	150	0.2	35	28	残	1.8	15	<0.1
1.0	147	188	151	1.0	62	28	残	1.0	16	<0.1
2.0	148	189	152	2.0	104	25	残	0.5	21	<0.2
3.0	149	190	153	3.0	92	21	残	0.5	22	<0.2

第4-2表 キャプセル番号67M-21G, 材質:制御材

非照射材							
試料番号	-	試験条件および結果					備考
		試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
○183 ○184	-	R.T.	-	61.5	16.0	-	1150°C×1h, O材 1w/o ボロンステン レス鋼
○191 ○192	-	R.T.	8.7	29.2	72.8	69.1	押出し材, 棒状 Ag-In-Cd 合金
○185 ○186	-	R.T.	29.5	66.1	20.4	23.0	1050°C, W.Q., 棒状 焼鈍材, 1w/o ボロン ステンレス鋼
照射材							
試料番号	照射条件	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	試料処理条件, 試料形状
	熱中性子照射量 n/cm ²						
183	2.0×10 ¹⁹	R.T.	85.3	99.7	1.7	-	[1150°C×1h, O材 1w/o Bステンレス鋼, 板状]
184	2.0×10 ¹⁹	R.T.	90.6	95.5	-	-	
191	8.0×10 ¹⁹	R.T.	22.9	35.2	65.0	-	[押出し材, 棒状 Ag-In-Cd 合金]
192	8.0×10 ¹⁹	R.T.	23.4	34.8	65.4	-	
185	2.0×10 ¹⁹	R.T.	64.7	78.8	12.2	-	[1050°C, W. Q. 棒 状, 焼鈍材, ボロン ステンレス鋼]
186	2.0×10 ¹⁹	R.T.	64.8	77.4	12.9	-	
187	1.2×10 ²⁰	R.T.	10.0	12.4	10.9	-	0.2 w/o B-Al合金, 板材
188	1.2×10 ²⁰	R.T.	8.7	11.7	10.2	-	1.0 w/o B-Al合金, 板材
189	1.2×10 ²⁰	R.T.	9.2	12.0	18.4	-	2.0 w/o B-Al合金, 板材
190	1.2×10 ²⁰	R.T.	9.4	12.3	16.4	-	3.0 w/o B-Al合金, 板材

第4-3表 キャプセル番号67M-21G, 材質; 制御材

非 照 射 材				
試料番号	材 質	—	硬さHv	備 考
0141	1w/oB入りステンレス鋼	—	186	1150 °C×1h, O材 試験荷重 5 kg
0144	1w/oB入りステンレス鋼	—	195	1050 °C, W.Q. 焼鈍材 試験荷重 10 kg
0170	Ag-In-Cd合金	—	59	押出材 試験荷重 5 kg
0171	Ag-In-Cd合金	—	69.8	押出材 試験荷重 5 kg
照 射 材				
試料番号	材 質	照射量 n/cm^2	硬さHv	備 考
141	1w/oB入りステンレス鋼	1.0×10^{19}	321	1150 °C×1h, O材 試験荷重 5 kg
144	1w/oB入りステンレス鋼	1.0×10^{19}	276	1050 °C, W.Q. 焼鈍材 試験荷重 20 kg
170	Ag-In-Cd合金	6.0×10^{19}	75.2	押出材 試験荷重 1 kg
150	B入りAl合金	3.0×10^{19}	10.9	試験荷重 50 g
151	B入りAl合金	3.0×10^{19}	12.2	試験荷重 50 g

第4-4表 寸法測定結果

測定点	長さ (mm)	巾 (mm)	板厚 (mm)	備 考
照 射 前	100.17	10.04	1.315	
照 射 後	100.17	10.05	1.25	積算照射量 $1.1 \times 10^{20} n/cm^2$ 測定3回の平均値
変化率 (%)	0	0.1	-4.9	

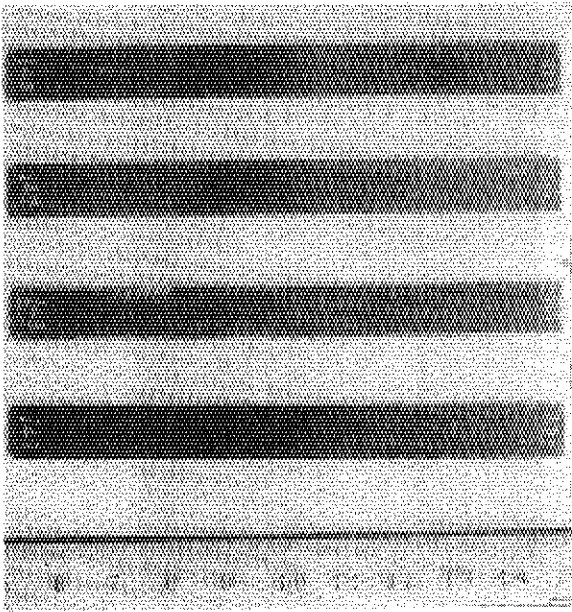


写真4-1 B入りAl合金 寸法測定試料

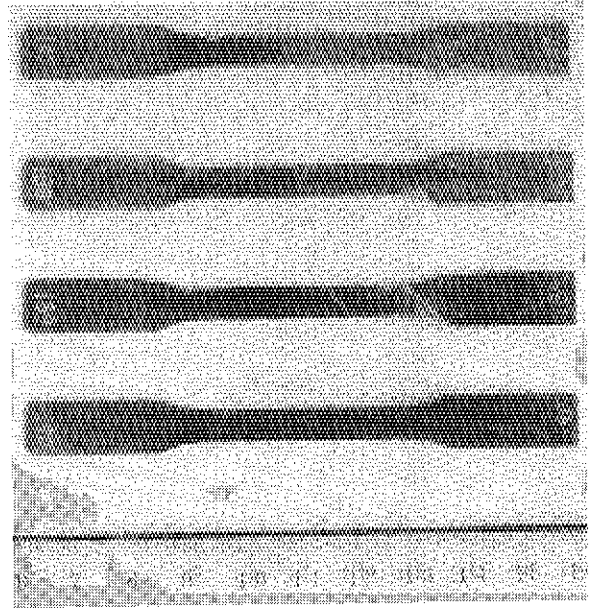


写真4-2 B入りAl合金 引張試験試料

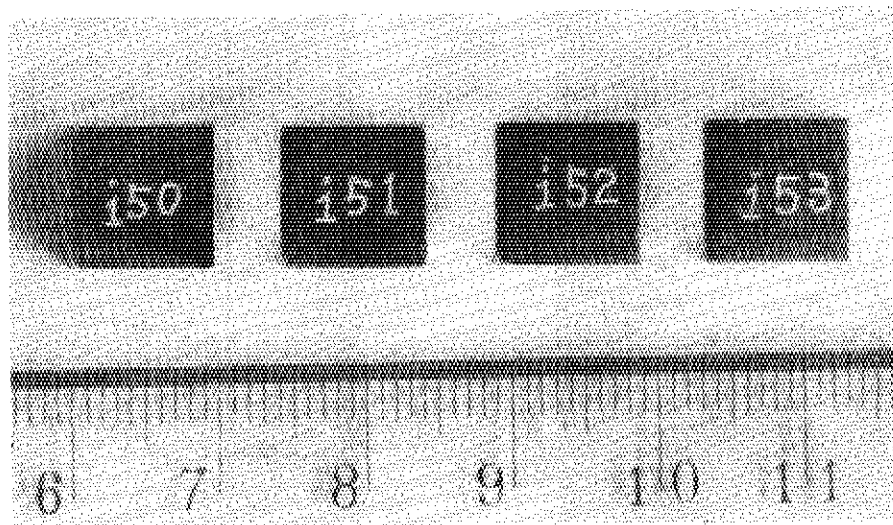
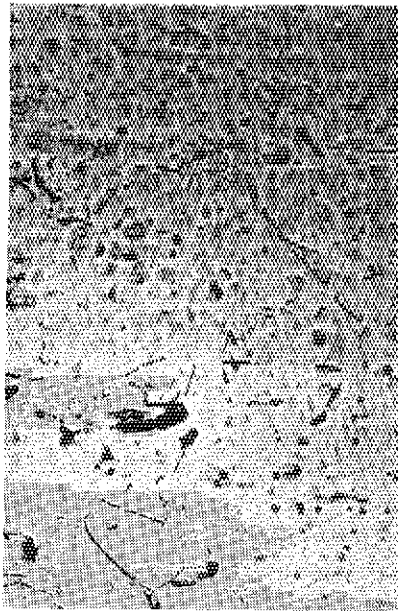
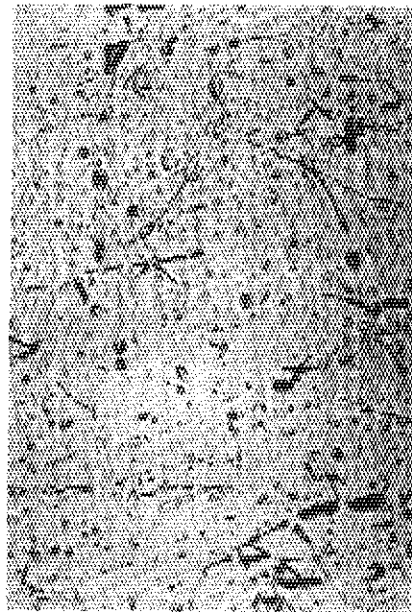


写真4-3 B入りAl合金 金相・硬さ試験試料

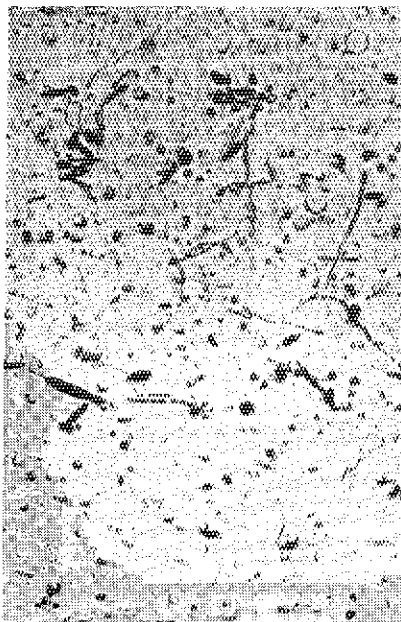


(a)

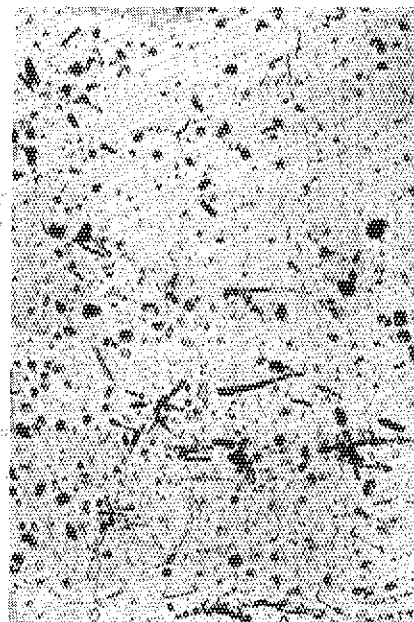


(b)

写真 4-4 試料番号 152 (B: 2.0%) の照射前組織 ($\times 400$)

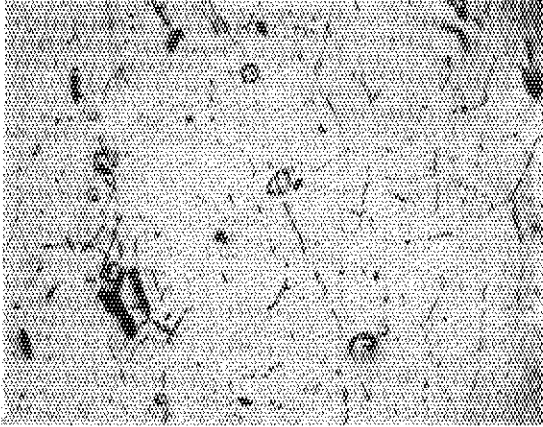


(a)



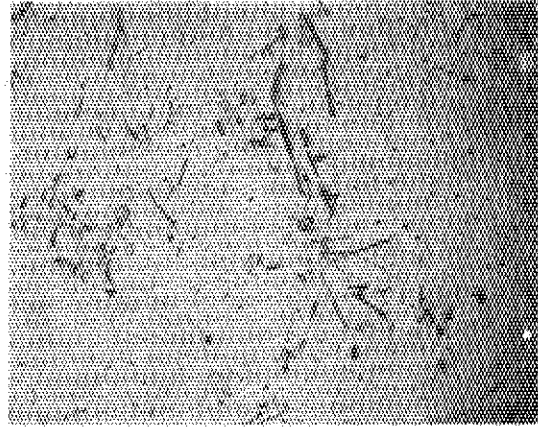
(b)

写真 4-5 試料番号 153 (B: 3.0%) の照射前組織 ($\times 400$)



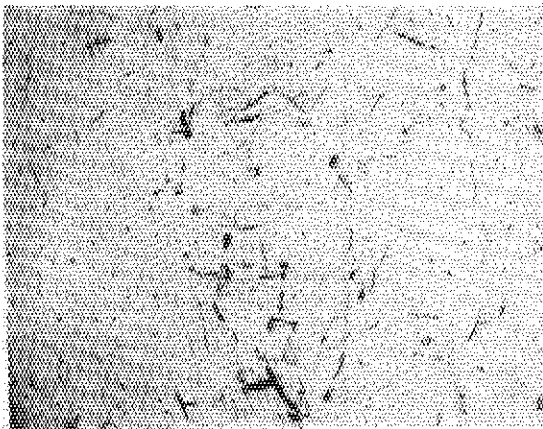
材質；Al-2%Bi，試料番号；152
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真4-6-a 照射後金相組織



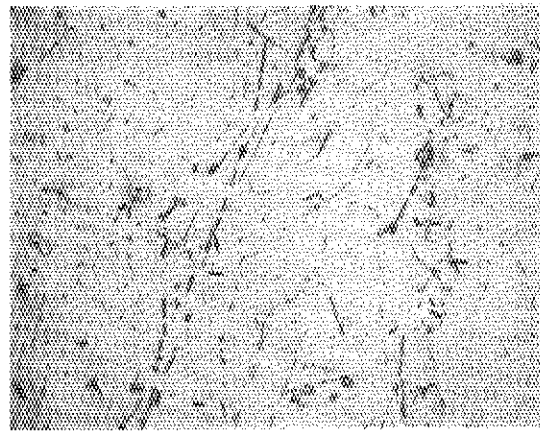
材質；Al-3%Bi，試料番号；153
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真4-6-c 照射後金相組織



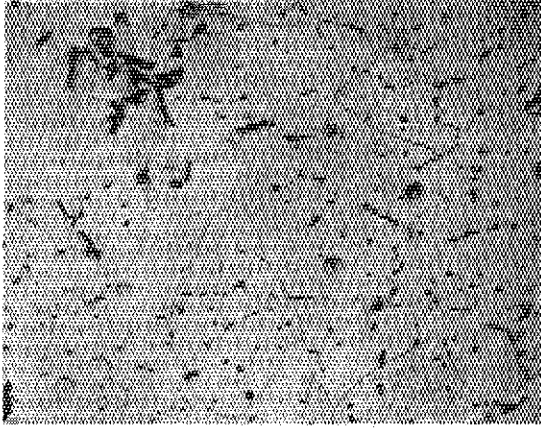
材質；Al-2%Bi，試料番号；152
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真4-6-b 照射後金相組織



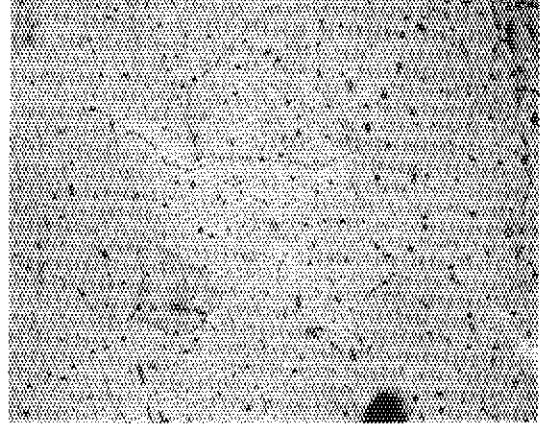
材質；Al-3%Bi，試料番号；153
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真4-6-d 照射後金相組織



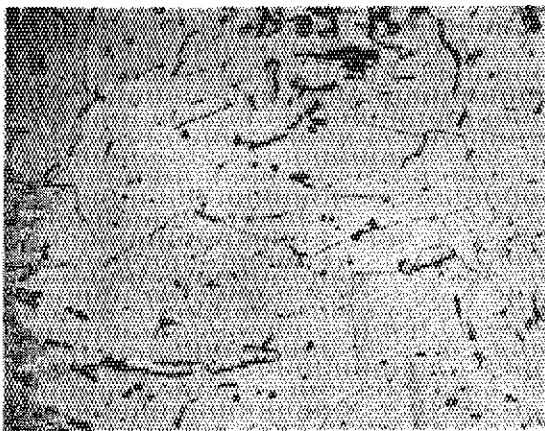
材質；Al-2%B, 試料番号；152
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真 4-7-a 照射後金相組織



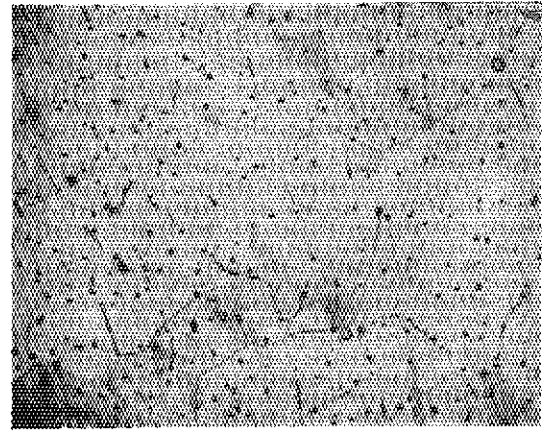
材質；Al-3%B, 試料番号；153
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真 4-7-c 照射後金相組織



材質；Al-2%B, 試料番号；152
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真 4-7-b 照射後金相組織



材質；Al-3%B, 試料番号；153
倍率；130 積算照射量； $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真 4-7-d 照射後金相組織

5 制御材 (1w/o ボロン入りステンレス鋼) の照射試験結果について (キャプセル番号 67M-21G)

JMTR 燃料フォロア用吸収板としての照射挙動を評価するため、濃縮ボロン入りステンレス鋼を照射実験に供した。

試料は 1w/o ボロン入りステンレス鋼で、歪取り焼鈍が $1150^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$ (O材) と、 $1050^{\circ}\text{C W. Q.}$ (NAS8LRI) の 2 種類である。O材については引張試験、硬度測定、金相試験の他、寸法測定も実施した。

まづ O材の引張試験結果は非照射材にくらべ引張強さ約 60% の増加であるが伸びはほとんど観察されないまでに減少していた。この試料の積算照射量は計画 $3.5\times 10^{20}\text{ n/cm}^2$ に対して、 $2.0\times 10^{19}\text{ n/cm}^2$ と非常に少なかった。

第 5-1 図~第 5-3 図に天然ボロン入りステンレス鋼 (18-8 ステンレス鋼) に対して得られた Savannah River Lab. のデータ¹⁾を示し本試験結果を記入する。ボロン濃縮度、濃度、および熱処理条件が異なるがほとんど同様な結果を示している。硬さ測定の結果は非照射材 $H_v=186$ から照射材 $H_v=321$ に、約 73% の増加を示した。これ等の強度試験データを第 5-1 表、第 5-2 表に示した。

寸法測定は引張試験片の標点部巾と肉厚とをマイクロメータを用い測定した。照射前後の測定結果を比較して第 5-3 表に示す。照射による寸法変化は標点平行部巾が 0.7~0.8%、肉厚が 6~7% 増しているのが注目される。原因は明らかでない。

金相組織の観察ではボロンの分散は均一であり、その他についても照射前のものと比較して特に変化はなかった。照射後の組織写真を写真 5-1 に示す。

次に $1050^{\circ}\text{C W. Q.}$ 溶体化処理材 (NAS8LRI) の引張試験結果は非照射材の 0.2% 耐力 29.5 kg/mm^2 に対し、照射材は 64.8 kg/mm^2 と増加が激しいが引張強さは 55% の増加を示したに過ぎない。伸びも割合に減少が少くなかった。硬さは非照射材 $H_v=195$ に対し照射材 $H_v=276$ と、約 42% の増加であった。(第 5-4 図)

金相組織の観察では照射による変化はほとんど認められず、これを写真 5-2 に示す。

O材、NAS8LRI 材の両者について云えることは照射量 (積算でいずれも $2.0\times 10^{19}\text{ n/cm}^2$) が少ない割合に強度データは顕著な変化を示しているが金相組織の観察ではいちじるしい変化が認められていないことである。

6 制御材 (Ag-In-Cd 合金) の照射試験結果について (キャプセル番号 67M-21G)

国産 Ag 合金制御材として Ag-In-Cd 合金の照射をキャプセル番号 67M-21G にて行い積算照射量は $6.0\times 10^{19}\sim 8.0\times 10^{19}\text{ n/cm}^2$ であった。照射後試験の結果は第 6-1 表、第 6-2 表に示す通りである。

引張試験の結果、積算照射量 $8.0\times 10^{19}\text{ n/cm}^2$ と当初の計画値より下まわっているが、引張強さ、および伸びの値はほとんど予想通りの変化を示している。しかし 0.2% 耐力値は非照射

材 8.7 kg/mm^2 に対し照射材 23.4 kg/mm^2 とかなりの増加をしていた。硬さ試料の積算照射量は $6.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ で硬さ測定の結果、予期した程度の増加を示している。

金相試験による照射前後の組織の観察結果では顕著な変化は認められない。照射材の組織を写真 6-1 に示す。

第5-1表 キャプセル番号67M-21G, 材質; 制御材

非照射材							
試料番号	-	試験条件および結果					備考
		試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
0183 0184	-	R.T.	-	61.5	16.0	-	1150°C×1h, O材 1w/oボロンステンレス鋼
0191 0192	-	R.T.	8.7	29.2	72.8	69.1	押出し材, 棒状 Ag-In-Cd合金
0185 0186	-	R.T.	29.5	66.1	20.4	23.0	1050°C W.Q., 棒状 焼鈍材, 1w/oBステ ンレス鋼
照射材							
試料番号	照射条件	試験条件および結果					備考
	熱中性子照射量	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
183	2.0×10^{19}	R.T.	85.3	99.7	1.7	-	[1150°C×1h, O材 1w/oBステンレス鋼 板状]
184	2.0×10^{19}	R.T.	90.6	95.5	-	-	
191	8.0×10^{19}	R.T.	22.9	35.2	65.0	-	[押出し材, 棒状 Ag-In-Cd合金]
192	8.0×10^{19}	R.T.	23.4	34.8	65.4	-	
185	2.0×10^{19}	R.T.	64.7	78.8	12.2	-	[1050°C, W.Q. 棒状 焼鈍材, ボロンス テンレス鋼]
186	2.0×10^{19}	R.T.	64.8	77.4	12.9	-	
187	1.2×10^{20}	R.T.	10.0	12.4	10.9	-	0.2w/oB-Al合金板材
188	1.2×10^{20}	R.T.	8.7	11.7	10.2	-	1.0w/oB-Al合金板材
189	1.2×10^{20}	R.T.	9.2	12.0	18.4	-	2.0w/oB-Al合金板材
190	1.2×10^{20}	R.T.	9.4	12.3	16.4	-	3.0w/oB-Al合金板材

第5-2表 キャプセル番号67M-21G, 材質; 制御材

非照射体				
試料番号	材 質	—	硬さ Hv	備 考
0141	1w/o B入り ステンレス鋼	—	186	1150 °C×1h, O材 試験荷重 5 kg
0144	1w/o B入り ステンレス鋼	—	195	1050 °C, W. Q. 焼鈍材 試験荷重 10 kg
0170	Ag-In-Cd合金	—	59	押出材 試験荷重 5 kg
0171	Ag-In-Cd合金	—	69.8	押出材 試験荷重 5 kg
照射材				
試料番号	材 質	照射量 n/cm ²	硬さ Hv	備 考
141	1w/o B入り ステンレス鋼	1.0×10^{19}	321	1150 °C×1h, O材 試験荷重 5 kg
144	1w/o B入り ステンレス鋼	1.0×10^{19}	276	1050 °C W. Q. 焼鈍材 試験荷重 20 kg
170	Ag-In-Cd合金	6.0×10^{19}	75.2	押出材 試験荷重 1 kg
150	B入り Al合金	3.0×10^{19}	10.9	試験荷重 50 g
151	B入り Al合金	3.0×10^{19}	12.2	試験荷重 50 g

第5-3表 寸法測定結果

試料番号	照 射 前							照射後	変化率(%)	
	183	184	140	183	184	140	平均		A	B
平行部巾	6,029	6,037	6,042	6,031	6,031	6,030	6,033	6,077	0.73	0.78
板 厚 さ	1,275	1,273	1,270	1,278	1,253	1,262	1,269	1,347	6.14	6.74

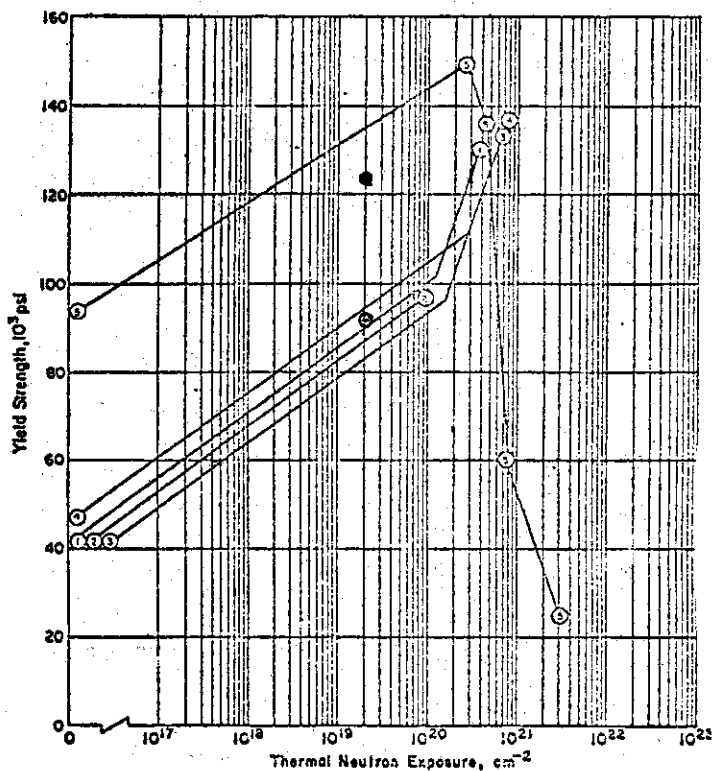
A ; 照射前値平均値に対する変化率

B ; 照射前値試料番号140の値に対する変化率

上記測定値は測定点3ヶ所の値の平均値である。

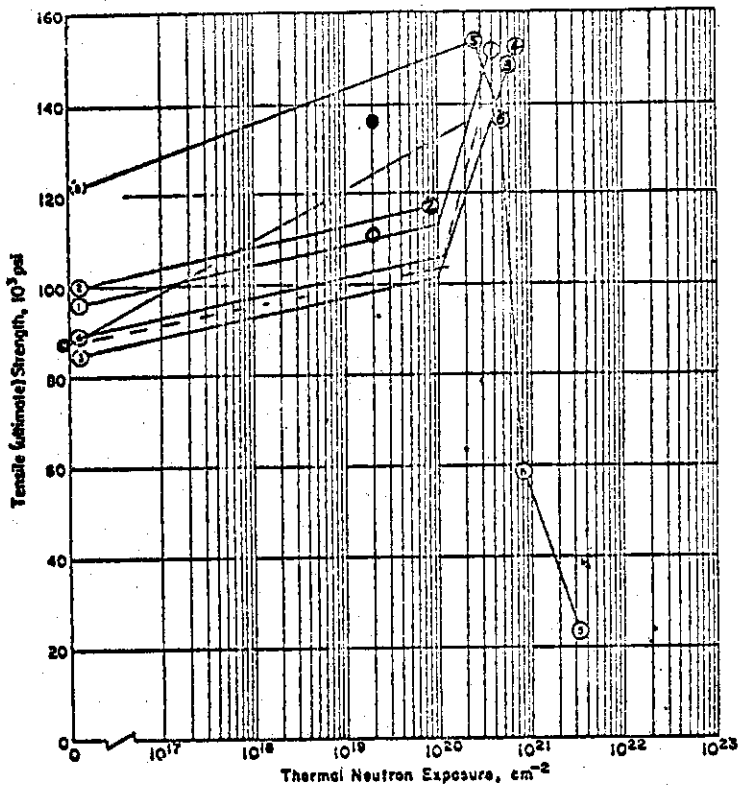
Data Points	Reference	Irradiation Temp, °C	Test Temp, °C	Preirradiation Conditions, etc.
1	WAPD-SFR-Fe-192	65	Room	Annealed at 1950°F for 1 hr, 1.18% natural B(a)
2	WAPD-SFR-Fe-192	65	Room	Annealed at 1950°F for 1 hr, 1.64% natural B(a)
3	WAPD-SFR-Fe-192	65	Room	Annealed at 1950°F for 1 hr, 1.8% natural B(a)
4	WAPD-SFR-Fe-192	65	Room	Annealed at 1950°F for 1 hr, 2.04% natural B(a)

(a) Entire composition of steel not available, listed only as 18-8 stainless.



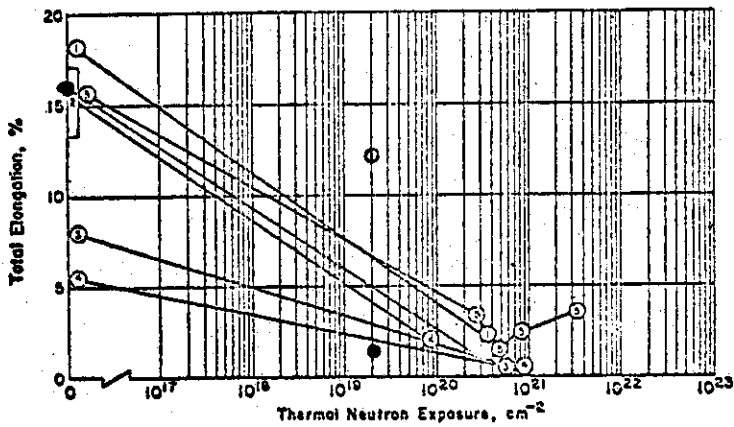
The stress-strain diagram of specimens with the three highest values of exposure showed no strain hardening but failed in the linear region of the curve.

第5-1 田 Yield strength of Boron Stainless



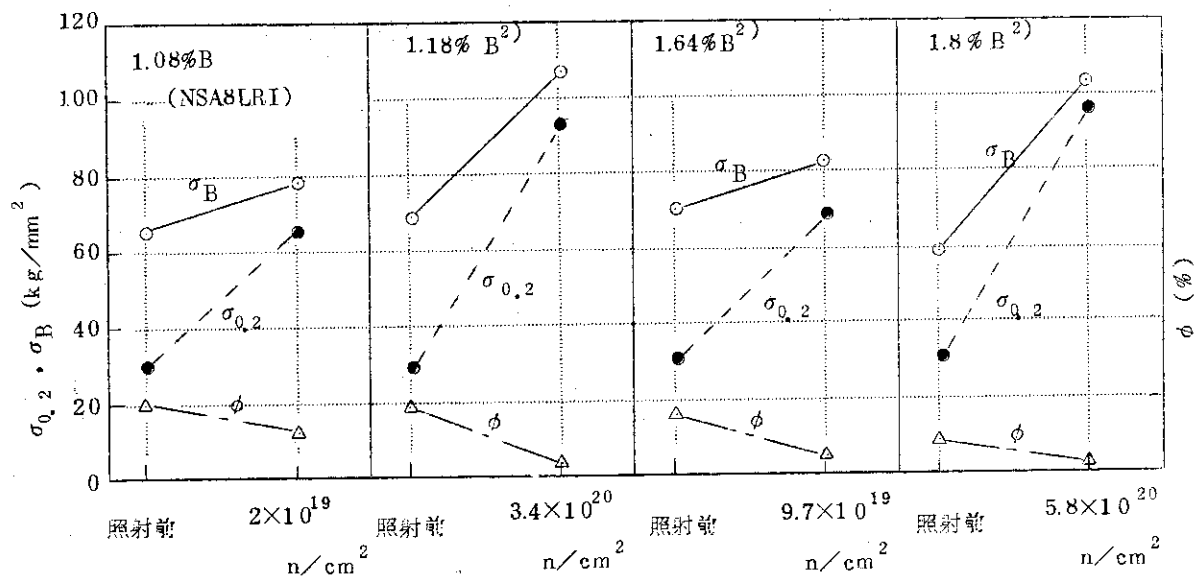
Loss in strength at high exposure thought to be due to gas inclusions.

第 5 - 2 ☒ Tensile strength of Boron Stainless

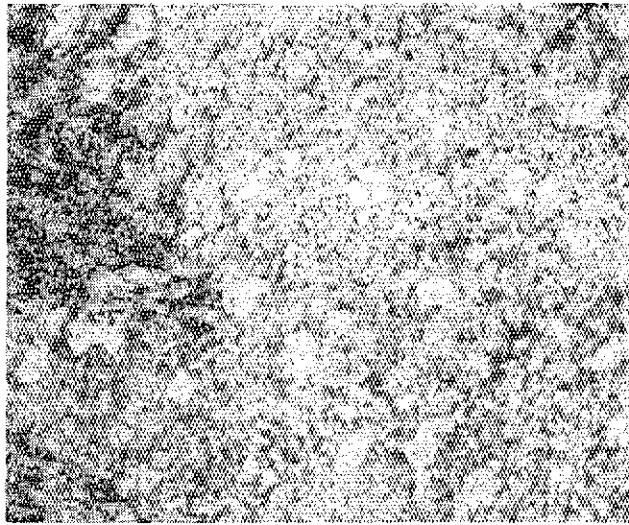


Total elongation in 1 inch. Values of elongation at two highest exposures thought to be due to irradiation growth.

第 5 - 3 ☒ Total elongation of Boron Stainless

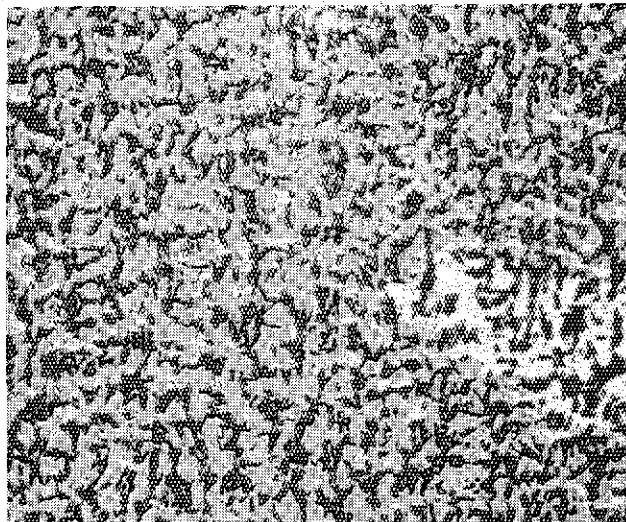


第5-4図 ボロンステンレス鋼の照射による機械的性質の変化



1150 °C × 1 Hr
歪取り焼鈍
積算照射量
 $\phi_t = 1.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真 5-1 1% ボロン入りステンレス鋼 (O材)
の照射材組織



1050 °C → W. Q
積算照射量
 $\phi_t = 1.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

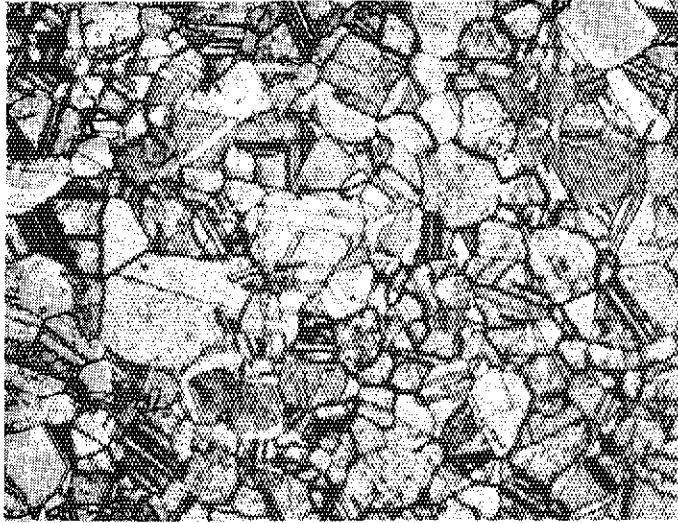
写真 5-2 1% ボロン入りステンレス鋼 (NAS8LR1)
の照射材組織

第6-1表 キャプセル番号67M-21G, 材質; 制御材

非照射材							
試料番号	-	試験条件および結果					備考
		試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
0183 0184	-	R.T.	-	61.5	16.0	-	1150°C×1h, O材 1w/oボロンステン レス鋼
0191 0192	-	R.T.	8.7	29.2	72.8	69.1	押し出し材, 棒状 Ag-In-Cd合金
0185 0186	-	R.T.	29.5	66.1	20.4	23.0	1050°C W. Q., 棒状 焼鈍材, 1w/oBステ ンレス鋼
照射材							
試験番号	照射条件	試験条件および結果					備考
	熱中性子照射量 n/cm ²	試験温度 °C	耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	
183	2.0×10^{19}	R.T.	85.3	99.7	1.7	-	1150°C×1h, O材 1w/oBステンレス鋼 板状
184	2.0×10^{19}	R.T.	90.6	95.5	-	-	
191	8.0×10^{19}	R.T.	22.9	35.2	65.0	-	押し出し材, 棒状 Ag-In-Cd合金
192	8.0×10^{19}	R.T.	23.4	34.8	65.4	-	
185	2.0×10^{19}	R.T.	64.7	78.8	12.2	-	1050°C W. Q., 棒状 焼鈍材, ボロンステ ンレス鋼
186	2.0×10^{19}	R.T.	64.8	77.4	12.9	-	
187	1.2×10^{20}	R.T.	10.0	12.4	10.9	-	0.2w/o B-Al合金, 板材
188	1.2×10^{20}	R.T.	8.7	11.7	10.2	-	1.0w/o B-Al合金, 板材
189	1.2×10^{20}	R.T.	9.2	12.0	18.4	-	2.0w/o B-Al合金, 板材
190	1.2×10^{20}	R.T.	9.4	12.3	16.4	-	3.0w/o B-Al合金, 板材

第6-2表 キャプセル番号67M-21G, 材質; 制御材

非 照 射 材				
試料番号	材 質	—	硬さ Hv	備 考
0141	1w/oB入り ステンレス鋼	—	186	1150 °C×1h, O材 試験荷重 5kg
0144	1w/oB入り ステンレス鋼	—	195	1050 °C, W. Q. 焼鈍材 試験荷重 10kg
0170	Ag-In-Cd合金	—	59	押出材 試験荷重 5kg
0171	Ag-In-Cd合金	—	69.8	押出材 試験荷重 5kg
照 射 材				
試料番号	材 質	照射量 n/cm ²	硬さ Hv	備 考
141	1w/oB入り ステンレス鋼	1.0×10 ¹⁹	321	1150 °C×1h, O材 試験荷重 5kg
144	1w/oB入り ステンレス鋼	1.0×10 ¹⁹	276	1050 °C, W. Q. 焼鈍材 試験荷重 20kg
170	Ag-In-Cd合金	6.0×10 ¹⁹	75.2	押出材 試験荷重 1kg
150	B入りAl合金	3.0×10 ¹⁹	10.9	試験荷重 50g
151	B入りAl合金	3.0×10 ¹⁹	12.2	試験荷重 50g



押出し加工
積算照射量
 $\phi_t = 8.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

写真6-1 Ag-In-Cd合金の照射材組織

7 ステンレス鋼被覆 B₄C 制御棒の照射について (キャプセル 番号 67M-21G)

本実験に用いた試料は B₄C 粉末を充填法によりステンレス鋼被覆管に封入したものである。B₄C 粉末の充填条件が異なる二種類のステンレス鋼被覆 B₄C 制御棒について照射試験による確性試験を行なった。

照射後の諸測定試験は事情により変更されたが試料の寸法変化およびボロンの同位体比の変化を測定した。

照射前における B₄C の分析値、B₄C 粉末の充填条件、および B₄C 充填制御棒の寸法値等を第 7-1 表～第 7-3 表に示す。この様にして調製された試料は照射の結果、積算熱中性子照射量で $5.4 \times 10^{19} \sim 6.6 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ の範囲にあった。

照射後、試料の寸法変化は照射前の測定値と比べると若干の相違が見られるが同一の傾向は示さず、むしろ測定器具等の違いによる測定誤差と考えられる。したがって、照射による寸法の変化はなかったとみなすことができる。照射後の寸法測定値を第 7-4 表に示す。

ボロン同位体の測定は炭酸ナトリウム溶解質量分析法によって行った。照射前後の ¹⁰B/¹¹B の比を分析した結果を第 7-5 表に示す。これ等の結果から、試料番号 i 5 7 (B₄C 粉末; 三成分系) の値は照射後において明らかに ¹⁰B の減少がみられるが、他のものはほとんど誤差範囲内である。したがって、今回の照射試験からはボロン同位体比の変化を定量的に結論づけることは不可能である。

第 7-1 表 B₄C の分析値

化学成分	B	C	Fe	Mn	Cu	Ti	Co
分析値(%)	77.0	20.7	0.20	0.04	0.005	0.002	<0.001

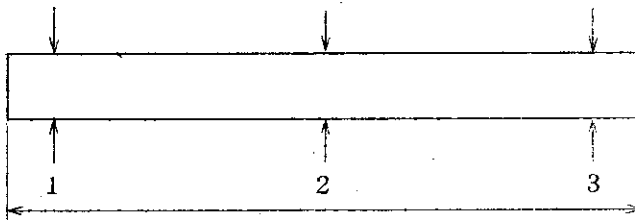
第 7-2 表 B₄C 粉末の充填条件

項目 試料番号	B ₄ C 粒度 (Mesh)	B ₄ C 量 (g)	B ₄ C 充填密度 (%)
i 5 4	-12+14 -42+60	3.10	63.1
i 5 5	"	3.11	66.3
i 5 6	-14+20 -60+80 -200+325	3.48	74.2
i 5 7	"	3.46	73.9

第7-3表 照射前の寸法測定値

試 番 \ 項 目	直 径 (mm)	全 長 (mm)
i 54	6.02~6.03	9.96
i 55	6.00~6.03	10.03
i 56	6.00~6.04	10.05
i 57	6.01~6.03	10.04

第7-4表 照射後の寸法測定値



試料番号 \ 項 目	直 径 (mm)			全 長 (mm)
	1	2	3	
i 54	6.05	6.04	6.05	100.0
i 55	6.06	6.05	6.07	100.5
i 56	6.04	6.01	6.03	99.8
i 57	6.03	6.01	6.01	100.2

- (測定器) (1) 全 長; ノギス 1/20mm
 (2) 直 径; マイクロメータ 1/100mm

第7-5表 ボロン同位体分析値

照 射 前		照 射 後	
試料番号	$^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$	試料番号	$^{100}\text{B}/^{11}\text{B}$
No 5	$(1\sigma)*n$ $0.2464 \pm 0.00031(11)$	i 54	$(1\sigma)*n$ $0.2456 \pm 0.00051(10)$
		i 55	$0.2467 \pm 0.00062(10)$
No 10	$0.2460 \pm 0.00041(10)$	i 56	$0.2467 \pm 0.00037(10)$
		i 57	$0.2418 \pm 0.00050(10)$

*n; 測定ピーク対の数

(分析法)

炭酸ナトリウム溶解, 質量分析

8 可燃性毒物棒 ($B_4C-Zry-2$ ペレット)の中性子照射について (キャプセル番号 67M-22G)

8.1 試料の概要

本実験に供試した可燃性毒物棒は 0.4w/oB 含有の B_4C 粉末とジルカロイ-2 粉末とをステージ加工して、 $[B_4C+Zry-2]$ のペレットとし、このペレットをステンレス鋼管に封入したものである。使用した $Zry-2$ 原料粉末の分析値を第 8-1 表に示す。被覆管の構造、寸法を第 8-1 図に示す。

これ等のペレットの 4 ケのうち、2 ケは分析用、金相用として特に短い寸法のものを使用した。

8.2 照射方法および照射量

ペレットを封入した可燃性毒物棒はリーキーキャプセルに組込み照射した。積算熱中性子量は第 8-2 図の通りである。キャプセル冷却水の温度は $50^\circ C$ である。

8.3 照射後試験結果

(1) ボロンの分析

照射後試料について硼分析を行ったが照射前の分析結果と変化なかった。

(2) 寸法測定

被覆管の外径および端栓部について、第 8-2 表に示す位置を測定した。照射前の値との比較を行いこれを第 8-3 図に示した。XY 方向の測定値 (繰返数 3 回) の平均値を図示したものであるが、ごくわずかに照射後の値が高くなっている。ただし、照射前と照射後の測定精度、測定器具の相異等を考慮した場合、誤差範囲内にあるものと解釈するのが妥当であるとみられる。

8.4 総括

0.4w/o の硼を B_4C 粉末としてジルカロイ-2 粉末に混合、ステージ加工したペレットをステンレス鋼被覆管 (SUS27) に封入した可燃性毒物棒は積算熱中性子照射量約 $1.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 \sim 2.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ であったが硼含有量、寸法変化等は照射前と比較して、照射による影響は見受けられなかった。

第8-1表 ジルカロイ-2原料粉末の分析値

(1) 合金元素 (%)

元 素	分 析 値
Sn	1.45
Fe	0.13
Cr	0.11
Ni	0.052
Fe+Cr+Ni	0.292

(2) ガス分析 (ppm)

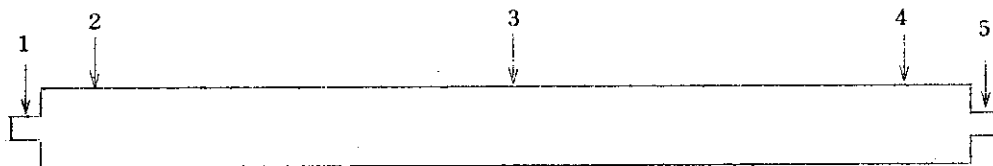
H	N	O
56	106	1930

(3) 不純物

不 純 物	ppm
Al	< 35
B	< 0.2
Cd	< 0.2
C	126
Co	< 5
Cu	—
Hf	< 100
Mn	< 25
Si	< 100
Ti	< 25
U	—
W	< 50

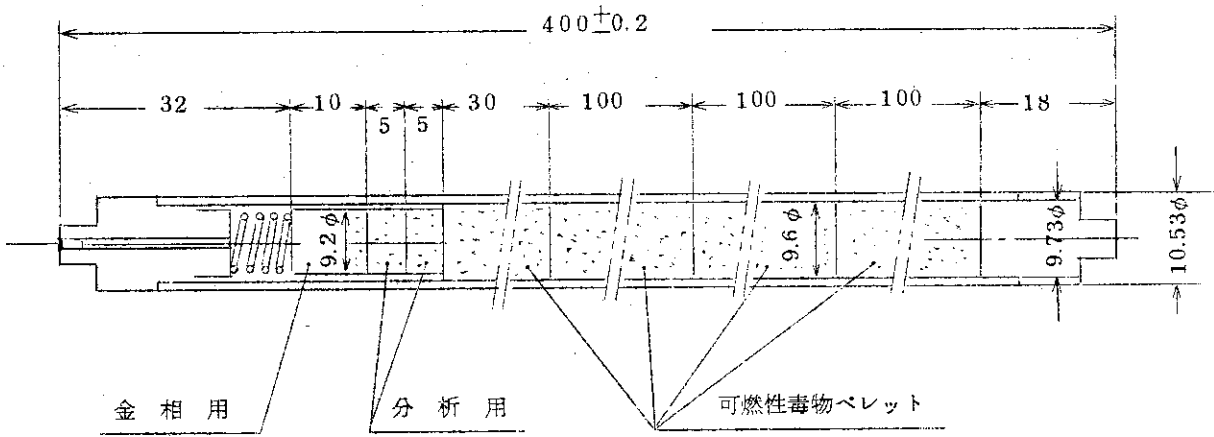
第8-2表 照射後試料の寸法測定結果
(被覆管外径)

(1) 測定位置

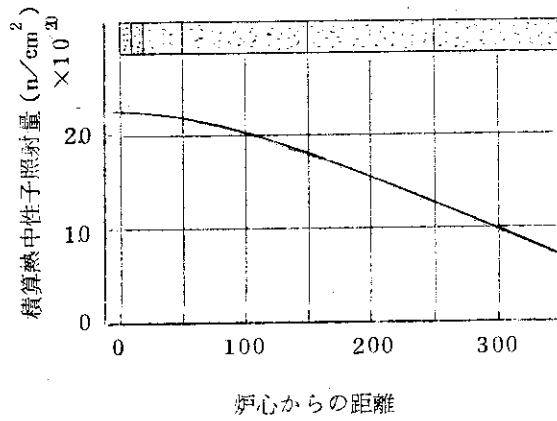


(2) 測定結果

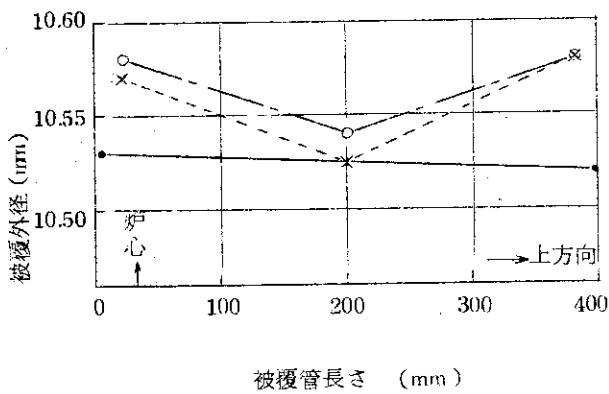
方向	測定位置 回数	1	2	3	4	5
	X	1	4.84	10.57	10.53	10.59
2		4.84	10.57	10.53	10.59	4.88
3		4.84	10.57	10.53	10.58	4.88
平均		4.84	10.57	10.53	10.59	4.88
Y	1	4.86	10.58	10.54	10.59	4.86
	2	4.86	10.58	10.54	10.59	4.86
	3	4.86	10.58	10.53	10.58	4.86
	平均	4.86	10.58	10.54	10.59	4.86



第 8 - 1 図 可燃性毒物棒



第 8 - 2 図 横算熱中性子照射量



第 8 - 3 図 被覆管外径寸法測定結果

9 B¹⁰のBurn upおよびB₄C充填試料の照射による寸法変化(キャプセル番号67M-22G)

9.1 B¹⁰のBurn upの解析

9.1.1 照射前後のB¹⁰の測定

第9-1表に照射前および照射後のB¹⁰の測定結果を示す。ボロン同位体の測定は炭酸ナトリウム溶解質量分析によって行った。

9.1.2 熱中性子照射量

本実験の試料の積算中性子照射量を第9-1図に示す。

9.1.3 解析

9.1.3.a) 計算条件および熱中性子分布

照射条件としては、キャプセル内ホルダーおよびその周囲の詳細条件が不明なので、B₄C制御棒試料1本を中心に含み、その周囲は無遠慮まで炉水が存在するものと仮定した円柱化セルにモデル化し、下記計算条件、即ち(第9-2図参照)

$$r_0 = 0.175 \text{ (cm)}$$

$$r_1 = 0.240 \text{ (cm)}$$

$$t_0 = 0.065 \text{ (cm)}$$

$$B_4C \text{ の充填密度} = \text{理論密度の} 71\% \text{ (試料番号} 256 \text{ の場合)}$$

$$= 67.9\% \text{ (同上} 257 \text{ の場合)}$$

$$B_4C \text{ の理論密度} = 2.504 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

$$\text{水温} = \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

その他各素成材の原子数密度等の所要常数を設定して、THENES(THERMOS相当)コード(一次元多群積分輸送理論コード、ここでは16群)による熱中性子束分布(COS. CURRENT 近似、円柱化セル計算)を求めると第9-3図のようになる。

9.1.3.b) B₄C充填試料内中性子束とB¹⁰の平均吸収断面積の補正

さて、B₄C充填試料のホルダー内の配置は第9-4図のようになっているので、フラックスモニター位置MとB₄C充填試料内平均中性子束の比を第0次近似として第9-3図より求めると

$$(\phi_X/\phi_M)_0 \approx 0.04895/0.852 \approx 0.0575 \text{ (X; A, B, C)} \quad (\text{A. 1})$$

また、B₄C充填試料内での平均吸収断面積 $\tilde{\sigma}_a(B^{10})$ は \bar{v} 値より

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_a(B^{10}) &= \sigma_a^{2200\text{mV/s}}(B^{10})/\bar{v}(B_4C) \\ &= 3836.0/1.477 \\ &= 2597 \text{ (barn)} \\ &= 2497 \times 10^{-24} \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (\text{A. 2})$$

次に、実際のB₄C充填試料の配置から ϕ_X/ϕ_M 比を定性的に考えて補正する。

$$\begin{aligned} \phi_A/\phi_M &= \phi_C/\phi_M > \phi_B/\phi_M > (\phi_X/\phi_M) \\ &= \alpha (\phi_X/\phi_M) \quad \alpha \text{は補正因子} \end{aligned} \quad (\text{A. 3})$$

$$\phi_B/\phi_M = \beta (\phi_X/\phi_M) \quad \beta \text{は補正因子} \quad \text{ただし, } \alpha > \beta \quad (\text{A. 3'})$$

然るに第9-4図より

$$\begin{aligned} \alpha &= (\phi_P/\phi_D) \times \phi_{2D}/\phi_D = 0.913 \times 0.952 / 0.852^2 \\ &= 1.197 \end{aligned} \quad (\text{A. 4})$$

$$\beta = (\phi_P/\phi_D)^2 = (0.913 / 0.852)^2 = 1.148 \quad (\text{A. 4'})$$

従って

$$\begin{aligned} \phi_A/\phi_M |_{B, C \text{ in}} &= \alpha (\phi_A/\phi_M) = 1.197 \times 0.0575 \\ &= 0.0688 \end{aligned} \quad (\text{A. 5})$$

$$\begin{aligned} \phi_B/\phi_M |_{A, C \text{ in}} &= \beta (\phi_B/\phi_M) = 1.148 \times 0.0575 \\ &= 0.0660 \end{aligned} \quad (\text{A. 5'})$$

9.1.4 照射後の B^{10} 残存率および照射試験値との比較

(n. v. t) $_M = 0.75 \sim 2.25 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 照射後の充填試料, A, B, C内の B^{10} 残存率 $\delta_A(B^{10}), \delta_B(B^{10}), \delta_C(B^{10})$ は

$$\begin{aligned} \delta_A(B^{10}) &= \delta_C(B^{10}) = e^{-\tilde{\sigma}_a(B^{10}) \times (n, v, t)_M \times \phi_A/\phi_M} \\ &= 98.7 \sim 96.1\% \end{aligned} \quad (\text{A. 6})$$

然るに, 照射試験前後の比は第1表より

$$0.2422 / 0.2463 = 98.3\% \quad (\text{試料番号 } \dot{2}56) \quad (\text{A. 6'})$$

これにより, 解析値(A. 6)は照射試験値(A. 6')を包含していることがわかる。

$$\begin{aligned} \delta_B(B^{10}) &= e^{-\tilde{\sigma}_a(B^{10}) \times (n, v, t)_M \times \phi_B/\phi_M} \\ &= 98.7 \sim 96.2\% \end{aligned} \quad (\text{A. 7})$$

照射前後の比は

$$0.2428 / 0.2477 = 98.0\% \quad (\text{試料番号 } \dot{2}57) \quad (\text{A. 7'})$$

これも解析値(A. 7)は照射試験値(A. 7')を包含しているので, 解析は妥当であると言える。

9.2 B₄C 充填試料の照射による寸法変化

9.2.1 He の Build up

9.2.1. a) B¹⁰ の Burn up した割合

第9-1表の測定値を求めると、

$$0.2477 - 0.2422 / 0.2463 = 0.0166 \text{ (試料番号 } \dot{2}56 \text{ の場合) (B. 1)}$$

$$0.2477 - 0.2428 / 0.2477 = 0.0197 \text{ (試料番号 } \dot{2}57 \text{ の場合) (B. 1')}$$

9.2.1. b) B₄C の単位体積当りの Burn up した体積

B¹⁰ の Burn up の測定時の試料は、POISON TUBE 内の B₄C が均一に混合されたものを測定したものとみなすと、(B. 1), (B. 1') を用いて

$$\left(\frac{0.350}{2} \right)^2 \cdot \pi \times 0.0166 = 0.001596 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (\text{B. 2})$$

$$\text{(試料番号 } \dot{2}56 \text{)} \quad (\text{B. 2})$$

$$\left(\frac{0.350}{2} \right)^2 \cdot \pi \times 0.0197 = 0.001893 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$\text{(試料番号 } \dot{2}57 \text{)} \quad (\text{B. 2'})$$

9.2.1. c) この中の B¹⁰ の原子数

$$(\text{B}^{10} \text{ の原子数密度}) \times 0.001596 = 1.533 \times 10^{22} \times 0.001596$$

$$= 0.2446 \times 10^{20} \text{ (試料番号 } \dot{2}56 \text{)} \quad (\text{B. 3})$$

同様にして、 $0.2901 \times 10^{20} \text{ (試料番号 } \dot{2}57 \text{)} \quad (\text{B. 3'})$

従って、この数が He の原子数に等しい。

9.2.1. d) He の重量

He の RELEASE 率を 20% とし、外部へ放出される He の重量 (G) を求めると、

$$G = \frac{0.2446 \times 10^{20} \times 0.2}{0.6022 \times 10^{20}} \times 4 = 3.249 \times 10^{-8} \text{ (kg)}$$

$$\text{(試料番号 } \dot{2}56 \text{)} \quad (\text{B. 4})$$

同様にして、 $3.853 \times 10^{-8} \text{ (kg)}$

$$\text{(試料番号 } \dot{2}57 \text{)} \quad (\text{B. 4'})$$

9.2.1. e) 単位体積当りに He のみたす体積 (V)

B₄C の充填率は試料番号 $\dot{2}56$ が 7.1%, 試料番号 $\dot{2}57$ が 67.9% であるから、

$$V = \left(\frac{0.350}{2} \right)^2 \cdot \pi \times (1 - 0.71) = 2.788 \times 10^{-8} \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\text{(試料番号 } \dot{2}56 \text{)} \quad (\text{B. 5})$$

同様にして、 $3.086 \times 10^{-8} \text{ (m}^3\text{)}$

$$\text{(試料番号 } \dot{2}57 \text{)} \quad (\text{B. 5'})$$

9.2.1. f) He の Build up Pressure

ヘリウム・ガスの温度を冷却材温度に等しい 40 °C とすると、完全ガスの状態方程式に

(B. 4), (B. 4'), (B. 5), (B. 5') を代入して

$$P = \frac{G \cdot R \cdot T}{V} = \frac{3.249 \times 10^{-8} \times 2.119 \times 10^2 \times (40 + 273)}{2.788 \times 10^{-8}}$$

$$= 0.0772 \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (\text{試料番号 } \dot{2}56) \quad (\text{B. 6})$$

同様にして、試料番号 $\dot{2}57$ は 0.0916 kg/mm^2 である。

9.2.1.g) POISON TUBE の外径の変位

照射後の寸法は He の内圧が掛かった状態で原子炉から取り出して測定しているのだから、外圧は大気圧とすると、外径の変位 U は

$$U = \frac{2P \cdot r_1}{E \left\{ \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 - 1 \right\}}$$

P ; 内圧 (kg/mm²)
r₁, r₀ ; POISON TUBE の外径および内径
E ; 縦弾性係数

$$= \frac{2 \times 0.0772 \times 2.4}{1.92 \times 10^4 \left\{ \left(\frac{2.4}{1.75} \right)^2 - 1 \right\}}$$

$$= 0.0000219 \text{ (mm)} \quad (\text{試料番号 } \dot{2}56) \quad (\text{B. 7})$$

同様にして $= 0.0000259 \text{ (mm)}$ (試料番号 $\dot{2}57$) (B. 7')

9.2.2 検 討

第 9 - 2 表から照射前後の寸法変化は mm 単位で小数点以下 2 桁以下にあらわれているが、(B. 7), (B. 7') はいずれも小数点以下 5 桁目にはじめて有効数字があらわれる程度である。このことから、この程度の照射量では He の Build up Pressure では Poison Tube の Swelling には全く影響をおよぼすことがないことがわかった。

それでは、照射試験結果にあらわれた程度の寸法変化の原因は何であろうか？ 文献の調査⁽¹⁾によれば、使用した Poison Tube 材 SUS-27 相当の 304 ステンレス鋼中に不純物として存在する極く微量の B¹⁰ が B(n, α)Li 反応によって生成する He ガスと照射によって生成する欠陥 (ボイド) が Swelling の原因となることが報告されているので、今回の照射試験の場合ではこのことの方が B₄C 中の B¹⁰ の Build up Pressure より支配的となるものと思われる。しかしながら定量的な検討は今後の調査に待つことにしたい。

9.3 結 論

B₄C 充填試料 3 本 (試料番号 $\dot{2}56$, $\dot{2}57$, $\dot{2}58$) をキャプセル内のホルダー内周に固定し、フラックスモニターをキャプセル内の中心軸上に配置して照射した場合、試料番号 $\dot{2}56$, $\dot{2}57$ についての B¹⁰ の Burn up 結果に対する解析を行なった。

解析に際しては、THERMOS 相当コードによって熱中性子束分布を求め、これによって B¹⁰ の平均吸収断面積を補正するとともに、上記 3 本の B₄C 充填試料相互の影響を考慮しながら各試料毎に対応する熱中性子束の補正を行なうことにより、照射後の B¹⁰ の残存率を照射試験結果と比較した。

結果は、照射試験結果と解析値がほとんど一致し、このような解析法でもその妥当性を立証することが出来た。

B₄C 充填試料，試料番号 256，および試料番号 257 につき，照射後の寸法変化を He の Build up Pressure の面から解析したが，この面からの影響はないことがわかった。他の原因として，B₄C の被覆管の照射によって生成する欠陥（ポイド）と（n, α）変換によって生成する He ガスが考えられ，むしろこれが支配的原因であろうと推測される。

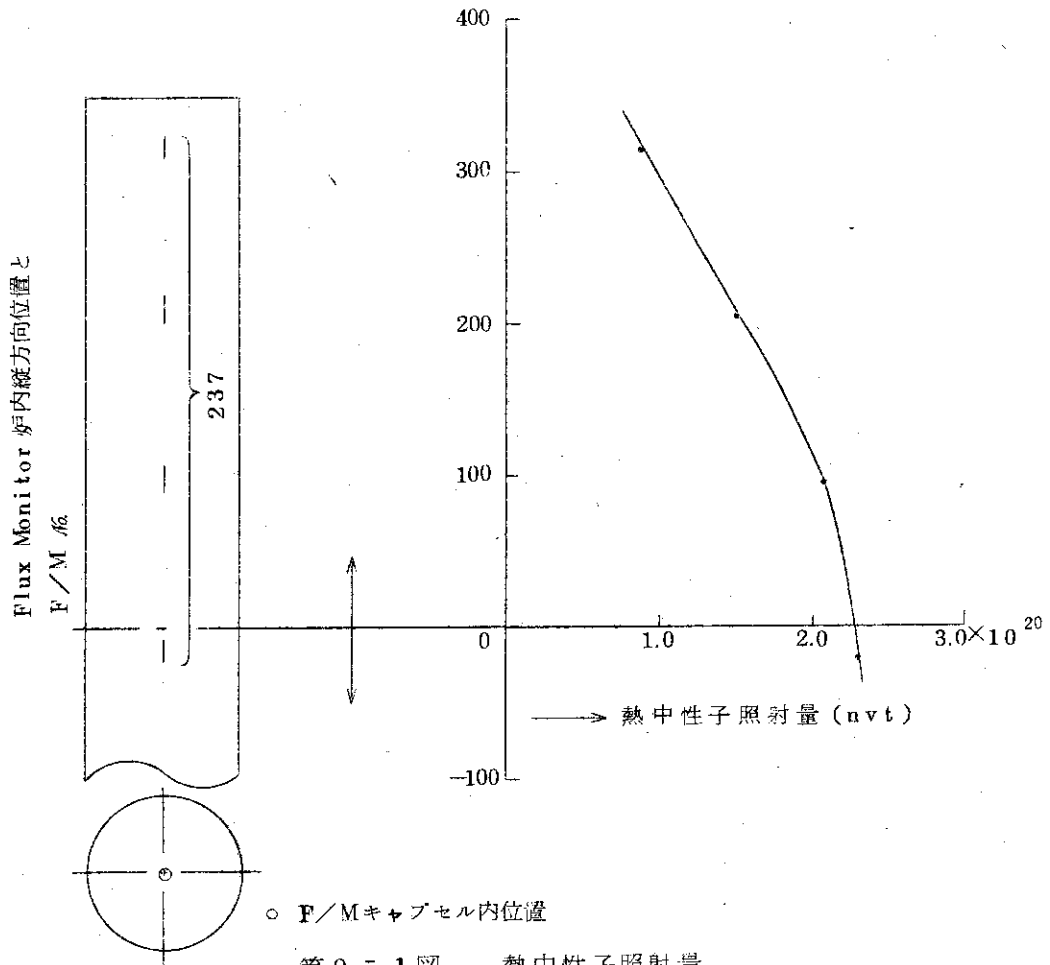
参考文献

- (1) J. J. Holmes ; J. Nucl. Mat. 29, 241 (1969) and J. J. Holmes and H. R. Brager ; Trans. Am. Nucl. Soc. 11, 479 (1968)

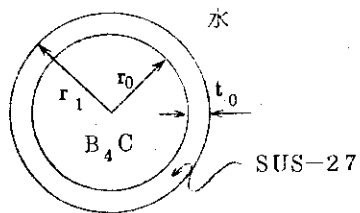
第9-1表 照射前後の B^{10} の量

試料番号	照射前		照射後	
	B^{10}/B^{11} (2σ)	(n)	B^{10}/B^{11} (2σ)	(n)
256	0.2463 ± 0.00053	(10)	0.2422 ± 0.00048	(10)
257	0.2477 ± 0.00033	(10)	0.2428 ± 0.00036	(10)

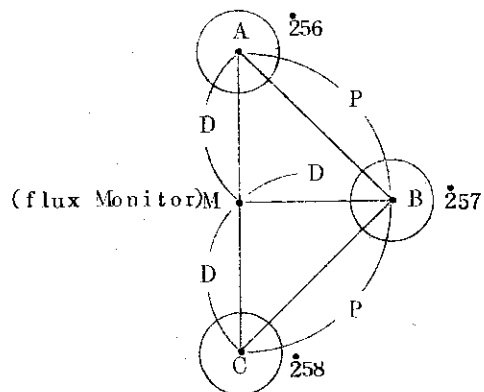
(n) : 測定ピーク対の数



第9-1図 熱中性子照射量



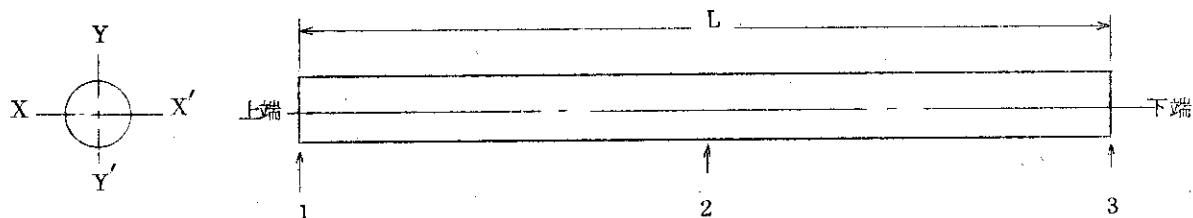
第9-2図 B_4C 充填試料断面



第9-4図 ホルダー内の B_4C 充填試料の配置

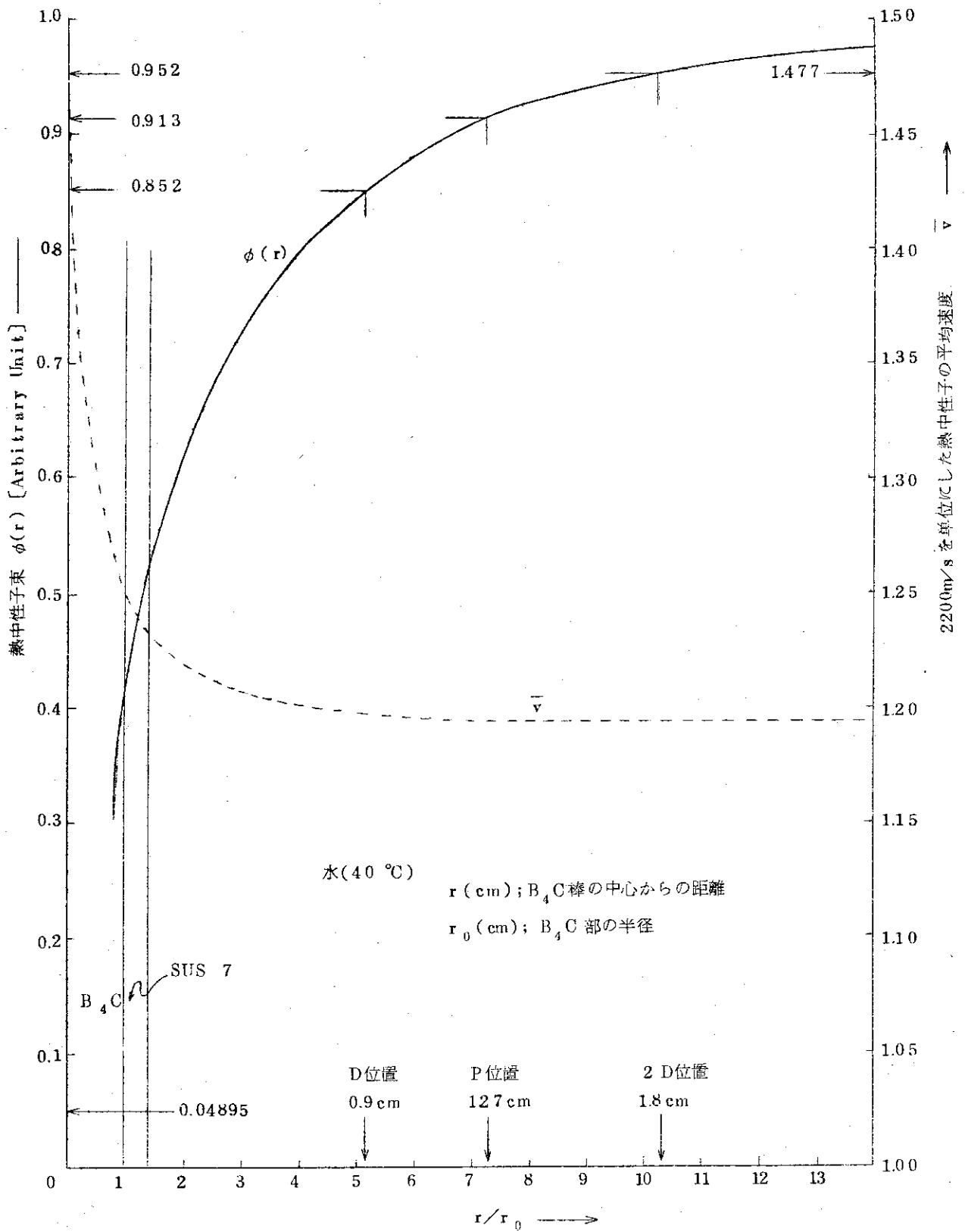
第9-2表 B₄C充填試料の寸法測定

(1) 形状および測定箇所



(2) 照射前および照射後測定結果

	試料番号	検査項目	1	2	3	L
照射前	256	外径 X	4.805	4.807	4.806	
		" Y	4.809	4.809	4.810	
		全長				399.9
		真円度	0.004	0.002	0.004	
		真直度	0.38/1000			
	257	外径 X	4.799	4.800	4.800	
		" Y	4.800	4.800	4.800	
		全長				400.0
		真円度	0.001	0	0	
		真直度	0.50/1000			
	258	外径 X	4.807	4.806	4.806	
		" Y	4.811	4.803	4.809	
		全長				399.8
		真円度	0.004	0.003	0.003	
		真直度	0.50/1000			
照射後	256	外径 X	4.82	4.82	4.82	
		" Y	4.81	4.81	4.84	
		全長				
		真円度	0.01	0.01	0.02	
		真直度				
	257	外径 X	4.83	4.81	4.81	
		" Y	4.84	4.80	4.83	
		全長				
		真円度	0.01	0.01	0.02	
		真直度				
	258	外径 X				
		" Y				
		真度				



第9 - 3図 熱中性子束分布 ($0 \leq E \leq 0.5316 \text{ eV}$)

10 特殊材料の中性子照射効果について (キャプセル番号 67M-5G)

10.1 試料の概要

水炉、高速増殖炉燃料被覆管、高温炉心構造材料として使用される可能性のある Nb-14%V, V-20%Ti, およびインコネル-600 について照射目標 $1.4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の高速中性子照射を行ない、照射後の機械的性質の変化を調べることがを目的とした。また、数種の超電導材料につき照射による特性変化を調べる目的で照射を行なった。

10.2 試験条件

照射量は目標値 $1.4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ($>1\text{MeV}$) に対して、積算中性子照射量で試料番号 193~198 に対して $1.2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ とほぼ目標値を満足したが試料番号 199~204 に対しては $8.9 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ とわずかに目標値をしまった。照射後の引張試験はいずれも 0.5mm/分の定速試験速度で行なった。試験温度は、室温およびこれらの材料の想定使用温度を選んだ。

10.3 引張試験

第10-1 表に引張試験結果をまとめて示す。

Nb-14%V 合金については予定の数量の試料を作製することができなかつたため、一部の試料を V-20%Ti 合金におきかえた。

これらの合金の照射前機械的性質は測定していないが、文献値によれば V-20%Ti については室温~700 °C 共、10~20%¹⁾ インコネルは両温度共~40%程度²⁾ の伸びがある。これと比較するとデータはいずれもくり返しが少く、はなはだばらついているが、伸びはいちぢるしく減少していることがわかる。

第10-1 図には V-20%Ti 合金についてのデータを図示した。なお V-合金の高温引張には真空中引張が必要であり、Nb-14%V 合金のような硬い材料に対してはチャックについてなお工夫が必要であることがわかった。

10.4 引張試験結果の検討

本試験が照射の効果を示しているか否かについては充分な量の照射前データと、くり返し回数をさらに多くした照射後のデータが必要である。

本実験の試料はいずれも小規に作製したものであり、とくに Nb-14%V 合金については、融解時の偏析や鍛造時の割れの問題が解決されなかつたので、試料数が充分でなく、何らかの結論を導き出すにはさらに多くの試験が必要である。

10.5 その他の試験

超電導材料としてリボン状のバナジウム, V_3Ga , および Nb-Zr 合金線材を照射し、 $7.0 \times 10^{20} \sim 1.2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の積算中性子照射量が得られた。

Nb-Zr 合金は誘導放射能が強く、持帰りが不可能であったため、照射後廃棄した。バナジ

ウムおよび G_3Ga 線材については持帰り後、なお放射能冷却中である。

なおいずれの試料もキャプセル解体後の目視検査を行なったが、ピンおよび各種リボン共異状な点は認められなかった。

10.6 結 論

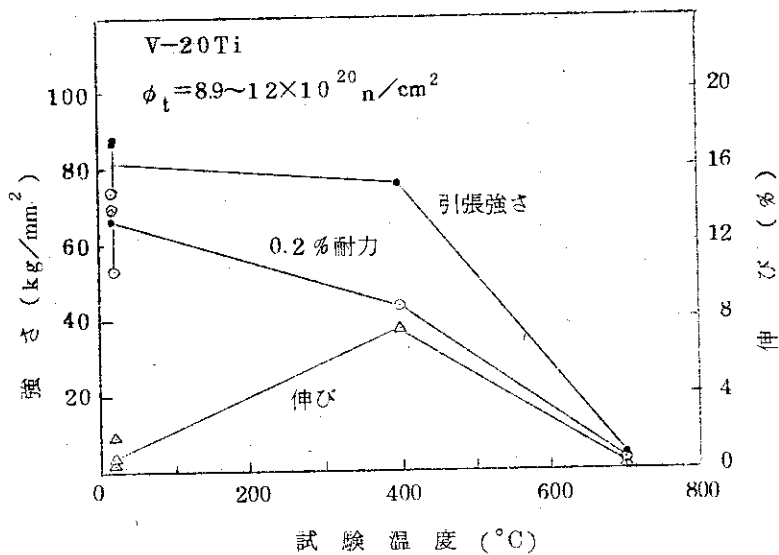
Nb-14%V, V-20%Ti, インコネル-600, 数種の超電導線材についての照射経験を
得、前3者については室温および高温で予備的な引張試験結果を得た。

参考文献

- 1) ANL-7438 March, 1968
- 2) 原子力ハンドブック 材料篇 商工出版 1957

第10-1表 キャプセル番号67M-5G, 材質; 特殊材

照射材		試験条件および結果					材質, 試料形状
試料番号	照射条件 速中性子照射量 n/cm^2	試験温度 $^{\circ}C$	耐力 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸び %	絞り %	
193	1.2×10^{21}	400	107.7	107.7	<0.2	—	Nb-14%V合金, 板状
202	8.9×10^{20}	R.T.	68.8	85.6	0.75	—	
203	8.9×10^{20}	R.T.	69.1	89.4	1.85	—	V-20%Ti合金 板状
197	1.2×10^{21}	R.T.	74.2	87.9	0.45	—	
194	1.2×10^{21}	R.T.	53.0	66.1	0.7	—	
199	8.9×10^{20}	400	43.2	75.5	7.6	—	
200	8.9×10^{20}	700	2.0	3.2	0.33	—	
198	1.2×10^{21}	R.T.	65.2	78.5	0.55	—	インコネル-600 板状
204	8.9×10^{20}	R.T.	68.8	73.6	1.55	—	
195	1.2×10^{21}	700	59.0	80.9	1.28	—	
201	8.9×10^{20}	700	10.0	13.6	0.55	—	



第10-1図 V-20w/o Ti合金の中性子照射の影響

11 希土類酸化物ペレットの照射効果について (キャプセル番号67M-22G)

11.1 試験の概要

希土類酸化物粉末をステンレス鋼に分散させた3種の粉末焼結体(それぞれ10w/oの Sm_2O_3 , Eu_2O_3 , Gd_2O_3 を含む)を照射し、外観試験、寸法試験および光学顕微鏡試験を行なった。

11.2 外観試験

外観試験は試料ピン(3本), およびペレット(3種)につき行なった。照射量は熱中性子積算で $2.0 \times 10^{20} \sim 2.8 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ であったがいずれも, 照射前と比べ何らの異状や変化はみられなかった。

11.3 寸法試験

寸法試験は試料ピン直径(3本)およびペレット長さ, 直径(3種)につき行なった。

ピン直径の測定については直角2方向各3回測定し, その平均値を第11-1表に示す。端部の数値がやや大きいのは端栓溶接部の影響と思われる。中央部直径のデータから, 本試験程度の照射(熱中性子 $2.0 \sim 3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$, 目標値 $8.7 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$)では試料のふくれ等の変形は認められないことがわかった。

ペレット寸法測定に関しては, 3種の試料より各1個ずつのペレットについて長さおよび直径をそれぞれ直角2方向で3回測定した。その結果を第11-2表に示す。

いずれの場合にも有意な寸法変化は認められない。

11.4 光学顕微鏡試験

3種のペレットにつき光学顕微鏡組織観察を行なった。刻印付の端面とは反対の鏡面仕上をしてある端面につき, バフ研磨仕上後 conc. HNO_3 ; conc. $\text{HCl} = 3; 1$ (容積比)の腐食液でエッチし, 約200倍および1000倍で写真撮影した。照射前後の組織を比較して写真11-1に示す。

写真で黒色部は希土類酸化物粒子であり, 白又は灰色の地はステンレス鋼粉末焼結粒である。粒界形状, 酸化物分散状態, 地と酸化物の界面等, 特に顕著な変化は認められなかった。

11.5 検 討

希土類酸化物, ステンレス鋼分散材料については, 米国で軍用原子炉の制御材料としての研究がなされており, Eu_2O_3 についてはステンレス鋼中のSiの存在で酸化物粒子にステンレス鋼の反応がおこり不安定性を生ずることが知られている。¹⁾ GdやSm酸化物についてはこのようなことは起らないようである。

150°F で $7 \sim 45 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 照射した Eu_2O_3 分散材でもステンレス鋼中のSiを0.03%以下にすれば膨張は起らなかった。¹⁾ 本実験においても, 約 $3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ まで

は3種の分散材とも寸法安定性は良好で、分散粒子と地の反応の傾向などもみられなかった。

なお、本実験ではフラックスモニターは3本のピンの中央におかれていたがステンレス鋼中のCoの放射能分析や希土類元素のバーンアップが知られればさらにくわしい知見が得られるであろう。

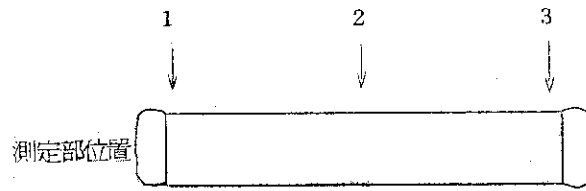
11.6 結 論

- (i) 希土類酸化物がステンレス鋼分散材について我が国で初めての照射経験を得た。
- (ii) 10% Re_2O_3 - ステンレス鋼分散材 (Re; Sm, Eu, Gd) について $2\sim 3 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (t.h.) の照射したものは、ピン寸法、ペレット寸法、ペレット組織上何らの変化も認められず、この種の制御材は本実験条件の範囲ではきわめて安定と考えられる。

参考文献

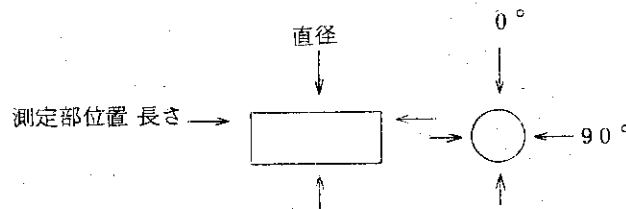
- 1) C. F. Leitten Jr. et al. ; ORNL-4104 (1967)

第11-1表 制御材ピン寸法測定 (単位mm)

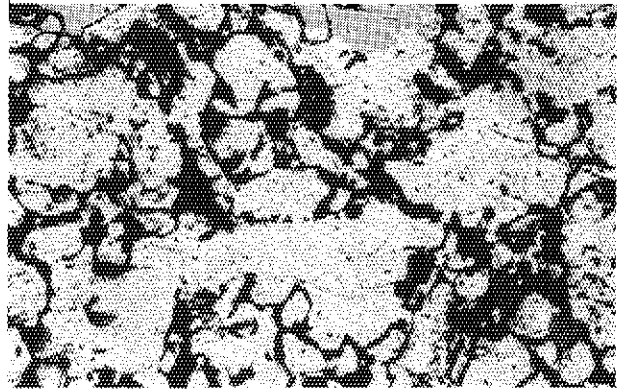
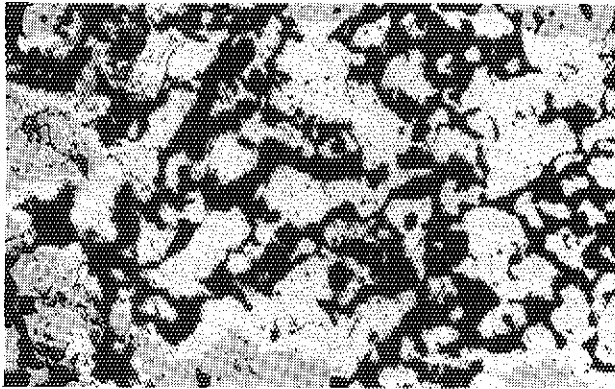


試料 №	268			270			272		
試料内容	Sm ₂ O ₃ ステンレス鋼			Eu ₂ O ₃ -ステンレス鋼			Gd ₂ O ₃ ステンレス鋼		
位置	1	2	3	1	2	3	1	2	3
X	8.10	7.98	8.02	8.07	7.94	8.02	8.00	7.94	8.05
Y	8.11	7.92	8.01	8.12	7.94	8.02	8.02	7.93	8.03
照射位置 (公称)	8.0±0.1			8.0±0.1			8.0±0.1		

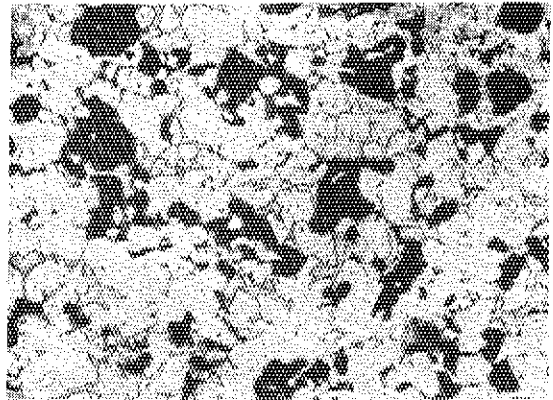
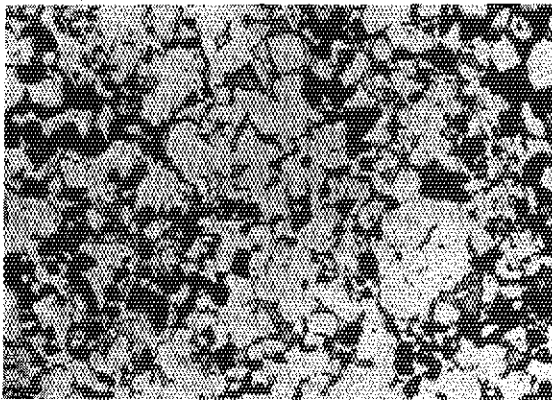
第11-2表 制御材ペレット寸法測定 (単位mm)



ペレット №	268		270		272	
試料	Sm ₂ O ₃ ステンレス鋼		Eu ₂ O ₃ ステンレス鋼		Gd ₂ O ₃ ステンレス鋼	
角度	X	Y	X	Y	X	Y
長さ	9.99	10.00	10.00	10.00	9.99	9.99
直径	4.99	4.99	4.97	4.98	4.99	4.99
照射前	長さ	10±0.05		10±0.05		10±0.05
	直径	5±0.05		5±0.05		5±0.05



A-a Sm_2O_3 ステンレス鋼 照射前 $\times 184$ B-a Eu_2O_3 ステンレス鋼 照射前 $\times 184$



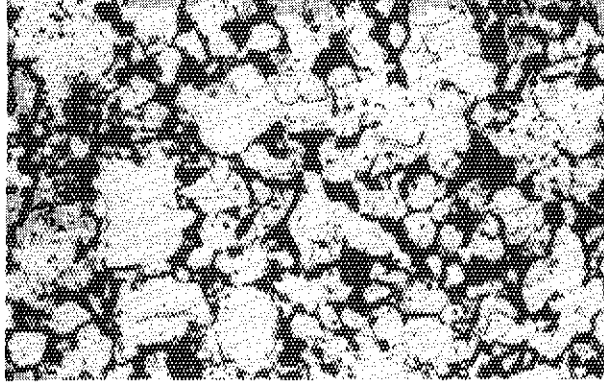
A-b Sm_2O_3 ステンレス鋼 照射後 $\times 150$ B-b Eu_2O_3 ステンレス鋼 照射後 $\times 150$

写真 11-1

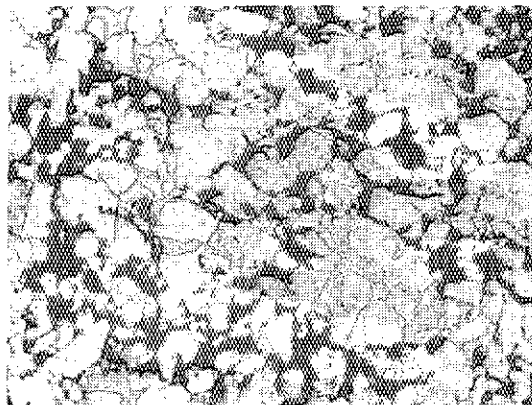
希土類酸化物ステンレス鋼制御材の組織

写真 11-2

希土類酸化物ステンレス鋼制御材の組織



C-a Gd₂O₃ ステンレス鋼 照射前 ×184



C-b Gd₂O₃ ステンレス鋼 照射後 ×150

写真11-3 希土類酸化物ステンレス鋼制御材の組織

照射キャプセル一覧

キャプセル番号	照射試料	試料提供者
67M-13G	Zry-4	神戸製鋼(K) 住友金属工業(S)
67M-14G	Zry-2	K
67M-15G	Zry-2, Zry-4	K
67M-16G	Zry-2, Zry-4	K, S
67M-17G	Zr-2.5Nb	原研(材・物)
67M-18G	Zr-2.5Nb	原研(材・物)
67M-23G	Zry-2	K, S
67M-24G	Zry-2, Zry-4	K, S
67M-33G	Zry-2, Zry-4	K, S
67M-42G	Zr-2.5Nb	原研(材・物)
67M-5G	Zr-V 特殊材 V-Ti インコネル	東京大学
67M-1G	Be, Be合金	日本碍石
67M-21G	B入りステンレス鋼	日本冶金
67M-21G	B入りステンレス鋼	原燃工
67M-21G	B入りアルミニウム	原燃工
67M-21G	B ₄ C充填棒	日立製作所
67M-21G	Ag-In-Cd合金	三菱原子力
67M-22G	B ₄ C充填棒	東芝
67M-22G	可燃毒物棒	三菱原子力
67M-22G	希土類酸化物	東京大学

V J M T R の試用期間照射結果報告書
(大学関係)

昭和四十八年 一月

J M T R 利用協議会大学関係グループ

目 次

1. 経 過	85
2. 研究題目および試料	85
3. 成 果	85

- Abstract -

Among investigators of universities, there have been extensive requirements of a study on the effects of pile irradiation of many kinds of materials such as common metals (Fe, Cu, Al, etc.), compounds (Fe_3Al , TiO_2 , etc.), and nuclear fuels (U, Th, UC, UO_2 , etc.). Along this line [or Accordingly], the Oarai Laboratory of the Research Institute for Iron, Steel, and Other Metals of Tohoku University was established in 1968 with the aid of the hot laboratory of the JMTR group of the JAERE. Now, irradiation of various kinds of materials and the associated experiments are practicable in this laboratory. Many investigations of material test is being continued steadily with fruitful results.

1 経 過

材料試験炉 (JMTR) は我国において high flux の照射実験の行ない得る唯一の原子炉であり、大学としても積極的に利用すべきであるとの考えのもとに昭和40年度に関係国立大学の研究者によりJMTR利用のための総合研究班が組織され、さらに日本学術会議原子力特別委員会原子力開発基礎研究部会の下部組織として、材料試験炉利用準備委員会が発足し、JMTR利用についての審議が行なわれた。試用期間の利用については、第1-1表に示すように多数の照射希望があり、high flux の照射を行なうため照射後試料は誘導放射能は強く、大学関係研究者が本格的に照射後実験を行なうためには大学独自の研究施設が必要であるとの結論に達し、昭和43年にJMTRに隣設して東北大学金属材料研究所の附属施設として材料試験炉利用施設が設置された。施設は全国の大学共同利用施設であり昭和45年度で第1期計画も完成し本格的に共同利用が行なわれている。

試用期間の試料の照射後研究は燃料試料の金相試験、FPガス捕集の一部の研究は原研東海研ホットラボに依頼して行なわれたが、他は放射能の弱い試料の各大学への持帰りを除いて全て材料試験炉利用施設の共同利用研究として行なわれたものである。なお、試用期間に照射した材料試料の一部および燃料試料については現在も研究が進行中である。

2 研究題目および試料

大学関係の試用期間の照射試料は第1-1表に示すように材料試料17件、計測キャプセル(67M-41u)1本、無計測キャプセル67M-38u, 39u, 40uの3本、燃料試料は計測キャプセル(67F-20u)1本、無計測キャプセル(67F-19u)1本に封入して照射された。照射孔および照射時期は第2-1表に示す。

研究題目は第1-1表から明らかなように原子炉材料および燃料の開発に関する基礎的知見を得るもの、金属、半導体およびセラミックス材料の照射損傷の基礎過程に関するもの、メスパウワァー等の線源の作製など high flux 照射によって期待される殆どどの分野の基礎的研究が計画されている。

3 成 果

試用期間照射後試料の研究成果については第1回(昭和46年11月発行)および第2回(昭和47年12月発行)の東北大学金研材料試験炉利用施設共同利用研究経過報告書に詳細に報告されているが、物理学会、原子力学会、金属学会等においても発表され、また昭和47年11月21日に共同利用研究討論会が材料試験炉利用施設主催で行なわれた。さらに昭和48年2月23, 24日の両日にわたって施設主催で材料照射研究討論会が開催され、材料の照

射後試料の研究成果についての発表と活発な討論が行なわれた。研究成果の詳細については材料試験炉利用施設発行の共同利用研究経過報告書に掲載されているが、2, 3の例について示す。

1) 10^{20} n/cm² の速中性子の照射した Cu₂MnIn, CuMnAl, Cu₂MnSn 等のホイスラー合金の磁性の照射効果について調べた結果、照射によって規則状態の試料は部分的に不規則になり、また逆に不規則状態の試料は部分的に規則状態になることが明らかになった。

2) Ti を 1.3×10^{20} n/cm² (>1 MeV) の照射量で照射した結果多くの黒点が形成され、それが 500 °C 40 分の熱処理によって 100~500 °A の転位ループに成長した。

照射後試料は硬度が高くなるが温度を変えて硬度の回復過程を調べた結果第 3-1 図、第 3-2 図に示すように 200 °C から回復が起り 600 °C で完了した。回復の活性化エネルギーは 0.95 eV である。

3) 4 nine およびさらにそれを 3 回のゾーン融解処理によって精製した純 Al の試料を 10^{20} n/cm² の速中性子量で照射した後 PH スタットで PH を精密に制御しながら腐食速度を測定した。その結果第 3-3 図に示すように照射によって形成される欠陥および ²⁷Al(np)²⁷Mg, ²⁷Al(nα)²⁴Na などの核反応による不純物生成にもとずく腐食速度の変化は観察されなかった。

4) 3×10^{18} n/cm² の速中性子量で照射したチタン酸バリウムの分域境界の照射効果について電顕で調べた。その結果、未照射試料での状態が照射試料では大きく変化しており、分域の構造およびその運動に対する照射効果が詳細に観察出来た。

5) Fe₃Al より Fe-rich 側の 19 at % Al-Fe 合金の焼入れ試料について照射し、メスbauer効果により短範囲規則配列が形成されるかどうかについて調べた。得られたスペクトルは第 3-4 図に示すように、強磁性に由来するある分布をもった 6 本のピークと常磁性によると思われる中央の 1 本の吸収ピークよりなっており、不規則、固溶体を照射しても短範囲が形成されるより、むしろ Fe-rich の領域 Al-rich の領域に分かれると考えた方がこのましい結果となった。

6) TiO₂ に 10^{20} n/cm² の速中性子を照射して EPR で測定した結果、第 3-5 図に示すように g = 2 の附近に非対称性の強い broad な微細構造を持たないスペクトルが見出された。

7) 高純度鉄単結晶および微量の炭素を含む鉄単結晶に 2.5×10^{19} n/cm² の速中性子の照射をし第 3-6 図に示すように液体窒素温度から 700 °C までの降伏応力の温度依存性について調べた。また、室温から 700 °C までの降伏応力の回復過程を調べた結果は第 3-7 図に示すように、純鉄の回復曲線がなだらかな回復を示すのに比較して炭素を含む試料が 300~400 °C 間において急激な回復を示す。これは照射欠陥と結合した炭素がこの温度領域で分離し、そのために急速に回復を示すものと考えられる。

8) Nb に 2.9×10^{20} n/cm² の速中性子を照射して、照射によって出来た欠陥と照射脆性との関係について調べた。照射した試料では電顕により多くの黒点が観察され、これを変形すると channeling が起りこれは介在物から発生している。液体窒素温度で変形すると未照射試料では延性破壊であるが、照射した試料では完全に劈開破壊をする。これらの現象をもとにして照射欠陥と照射脆性について定量的に取扱った。

9) 陽電子対消滅による金属の電子状態の研究

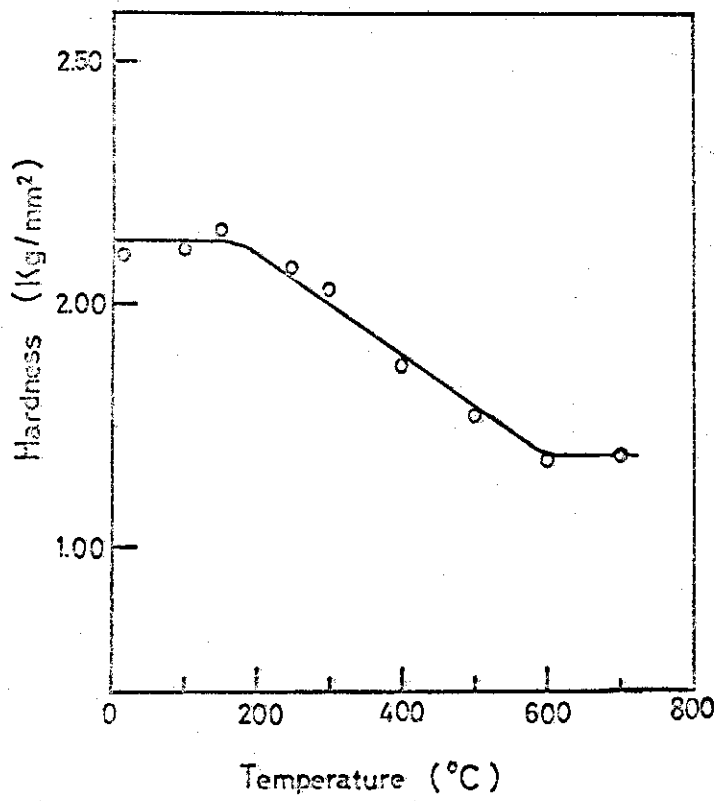
水カラビット1号機はJ M T Rの運転とともに実用期間としてスタートしたため、試用期間の申込みからはけずされているが、しかし、J M T Rの運転開始とともに活発に利用され、特に陽電子対消滅による金属の電子状態の研究は数多くの成果が出され液体金属、銅ゲルマニウム、銅ニッケル合金等のフェルミ面の決定がなされた。

第 1 - 1 表

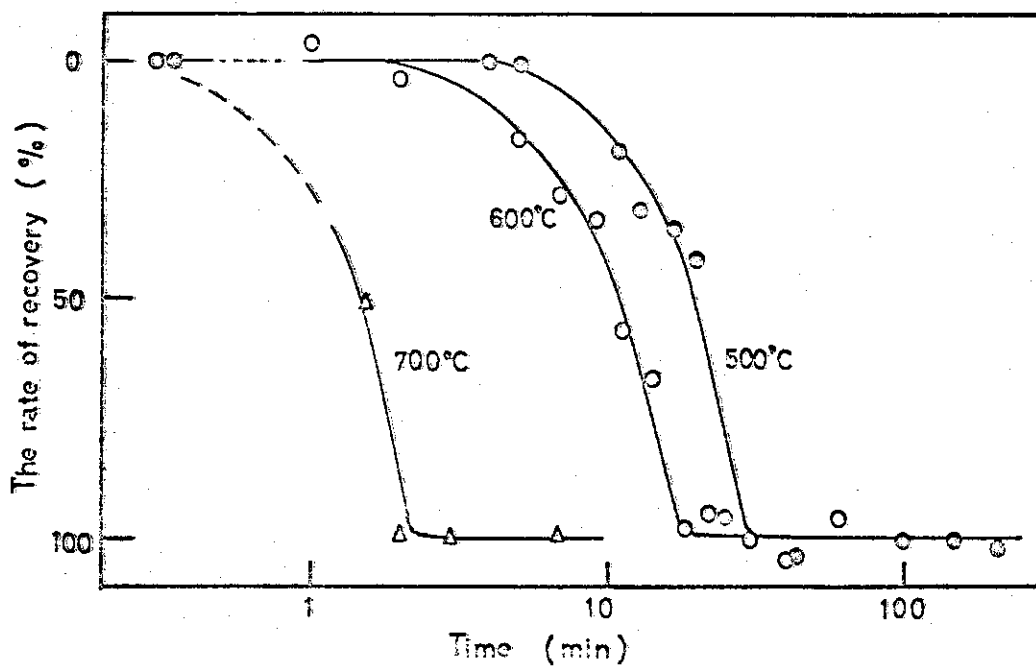
分類	キャプセルNo	担当者	試料	実験題目
試用一回	67M-38u	北大 諸住 高	Al	腐食特性に対する照射の影響
		阪大 吹田 徳雄	Nb ₃ Zr	超電導体の放射線損傷の研究
		阪大 佐野 忠雄	V, Nb	照射によるV, Nb中へのCの拡散の変化の研究
	67M-39u	東大 秋山 守	Al, Ni	Al, Niの放射線損傷の研究
		東大 橋口 隆吉	TiO ₂ , Ge	半導体および体心立方金属の照射損傷の研究
		九大 江口 鉄男	Cu	照射による微細構造の変化の研究
		北大 諸住 高	Al	腐食特性に対する照射の影響
		東北大 渡辺 浩	Sn ¹¹⁸	規則格子の放射線損傷
		東北大 平林 真	Ti, Nb	侵入型化合物の放射線損傷の研究
		東北大 幸田 成康	Fe, Ti, Nb	Be, FeおよびZr合金の放射線損傷の研究
		東大 井形 直弘	Fe	鉄に対する照射効果の研究
		九大 北島 一徳	Fe	鉄の機械的性質に対する照射効果の研究
東大 秋山 守	Al, Ni	Al, Niの放射線損傷の研究		
試用二回	67M-40u	東北大 幸田 成康	Be 焼鈍材 Be 加工材	Be, FeおよびZr合金の放射線損傷の研究
		東北大 渡辺 浩	C ₁₅ S ₆ , Fe ₇ S ₈ Cu ₂ MnSn	規則格子の放射線損傷
	67M-41u	東北大 幸田 成康	Zr Be, Ni foil	Be, FeおよびZr合金の放射線損傷の研究
		東北大 平林 真	TiO, Ni	侵入型化合物の放射線損傷の研究
	67F-19u	阪大 品川 睦明	UO ₂	F.Pおよび超ウラン元素の化学挙動の研究
		京大 柴田 俊一	U	原子炉チャッパまたはライナック中性子
		京大 柴田 俊一	Th	飛行時間分析法による断面積および原子炉の反応度測定
		東工大 鈴木 弘茂	UO ₂ -BeO	分散型燃料の照射後試験
		東工大 鈴木 弘茂	UC-SiO	分散型燃料の照射後試験
		東北大 鈴木 進	UO ₂	超ウランの分離
		東北大 菅野 卓治	UO ₂	超ウランの分離
		67F-20u	阪大 井本 正介	UR, UP-ThP
京大 西明 太	UN, US		UN, USの照射後試験	
名大 桐原 朝夫	UC etc		炭化物燃料の照射損傷	
東北大 矢島 聖使	UO ₂		F. P 偏析状態の研究	
名大 松本 元一	UC		炭化物燃料の照射損傷	

第 2 - 1 表

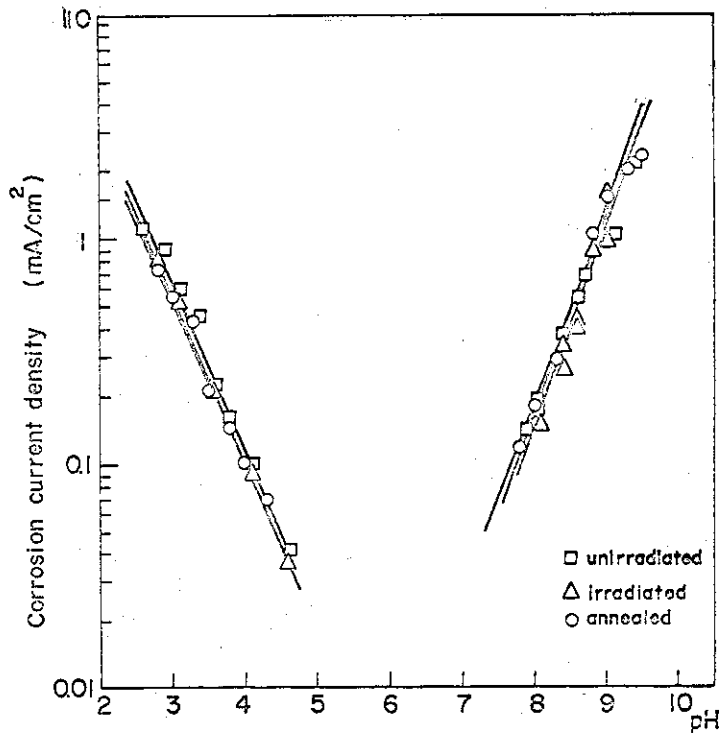
年度	月													
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	サイクル	3	4	5	6	7	8	9						
	計測						67F-20u 67M-41u							
	無計測	67M-38u 67M-39u						67F-19u						



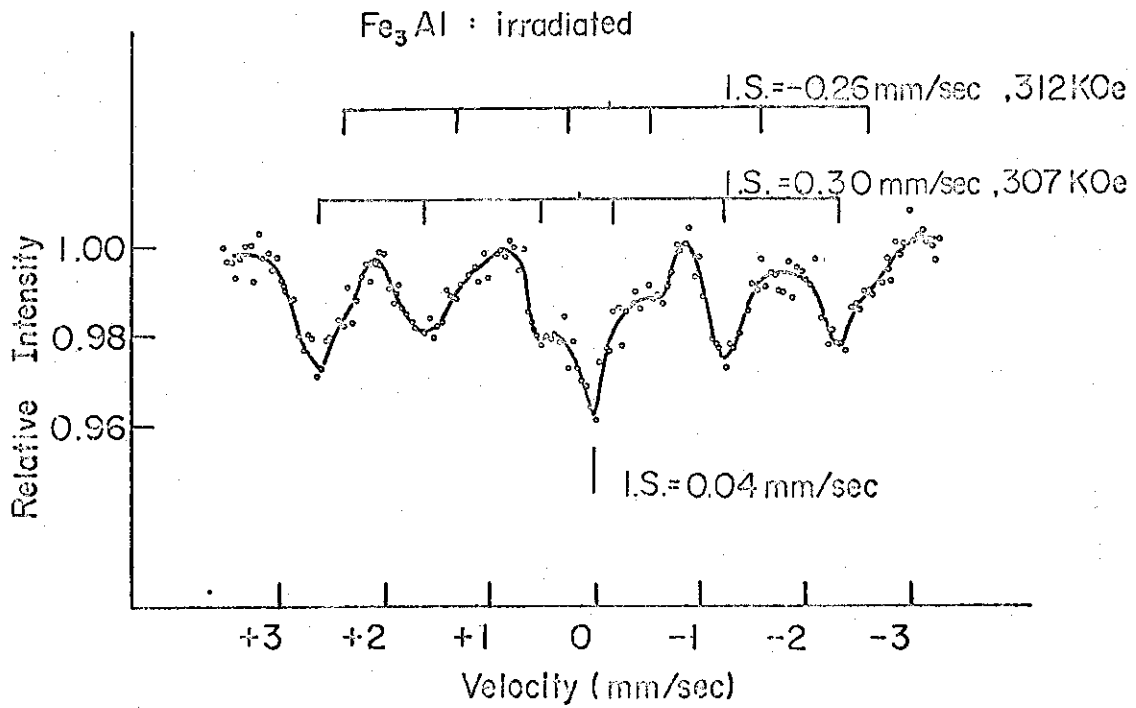
第 3 - 1 图 Isochronal recovery of hardness



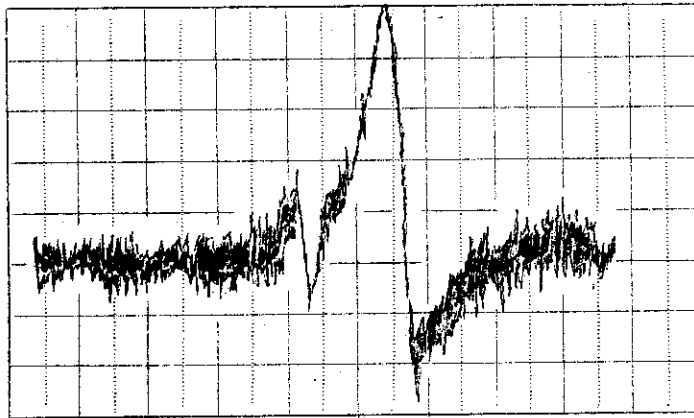
第 3 - 2 图 Isothermal recovery of hardness



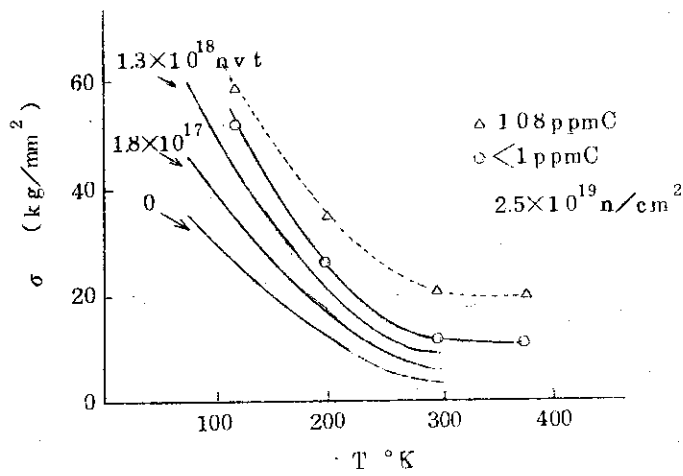
第3-3図 フォーナイン級アルミニウムの腐蝕にたいする照射ならびに焼鈍の影響



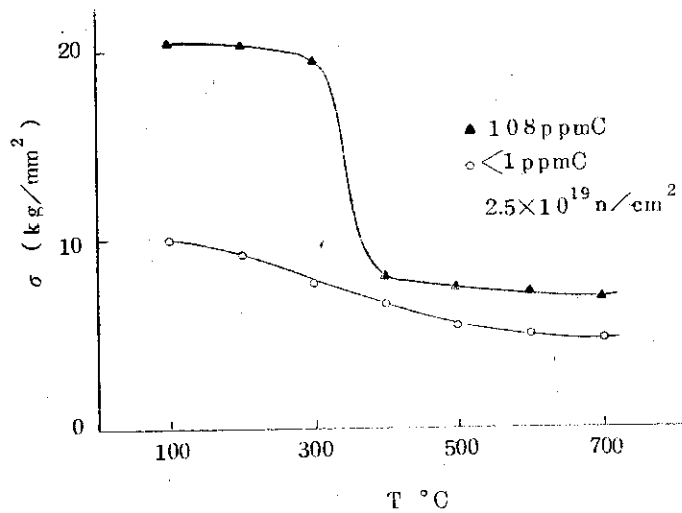
第3-4図 照射した Fe₃Al のメスバウースペクトル



第 3 - 5 図 照射後の EPR スペクトル $H \parallel \langle 100 \rangle$



第 3 - 6 図 降伏応力の温度依存性



第 3 - 7 図 常温降伏応力の等時焼鈍回復曲線
100 °C/30 min

Ⅵ J M T R の試用期間照射結果報告書
(R I 関係)

昭和四十八年 八月

日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部

目 次

1. まえがき	95
2. 照射試料の選択	95
3. 試料の包装および検査	95
4. 照 射	96
5. 照射後試験および結果	96
6. 照射孔と中性子束	97
7. ま と め	97

- Abstract -

The Division of JMTR Project, Oarai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, had carried out series of the test irradiations during preliminary utilization of the JMTR to obtain techniques and data necessary for the future full-scale utilization. The Division of Radioisotope Production, Radioisotope Centre, participated in the program, concerning radioisotopes production. Twenty eight kinds of target materials were irradiated, looking to the future possible requirement. Physical and chemical states of the irradiated materials were examined, as well as the problems involved in handling, and yields of the radioisotopes and neutron fluxes at the irradiation positions were determined. The results obtained were not largely different from those expected, and they would be useful for the future irradiations.

1 ま え が き

JMTRの試用期間(炉出力30MW)を利用しての照射試験の実施に際して、RI(ラジオアイソトープの略称)関係は、日本原子力研究所、アイソトープ事業部製造部が試料の提供、照射後試験および試験結果のまとめを担当した。製造部では、JMTRが実用期間に入ってから照射、製造されると予想されるRIの種類を考慮して、照射の安全性、照射後試料の取扱いおよび生成放射能などを知るために適当なターゲット物質を選んで照射することにした。

2 照射試料の選択

照射試料の選択にあたってはJMTRにおける照射条件が在来の研究炉の場合と比べてはるかに高い中性子束であることおよび長期間の照射であることを考慮して、在来研究炉による照射経験から外挿してある程度の安全性確保が予想できるターゲット物質28種を選んだ。これら試料の物理的、化学的性質、性状、主要目的核種およびそれらの主な用途を第2-1表に示す。

3 試料の包装および検査

照射用ターゲットの包装については、照射中の安全性や照射後の取扱いの容易さを考慮して製造部が材料試験炉部と詳細に検討打合せを行なってターゲットの種類別に包装状態を定め、在来研究炉の照射に使用していた状態までターゲットを包装したものを“RI試料”としてこの外側を材料試験炉部でJMTR照射用に設計、製作したキャプセル¹⁾(水送管照射用ラビットキャプセルを含み、以下照射用キャプセルと呼ぶ)に一重あるいは二重に熱溶接により封入することにした。金属のターゲットは、針状、線状、塊状、粒状、粉状、円板状、ペレット状とその形態は多種多様であったが、化学的、物理的には比較的安定であり、コバルトやイリジウムターゲット以外は直接簡単なアルミニウム製容器(以下インナーキャプセルと呼ぶ)に入れて後、冷間圧接型アルミニウム製キャプセル²⁾(RI試料用容器で以下単にキャプセルと呼ぶ)に入れて冷間圧接により密封し、これらを照射用キャプセルに封入した。針状のコバルトの場合はグラファイトスペーサーにあけた孔にターゲットを挿入し、また円板状とペレット状のコバルトおよびペレット状のイリジウムについては照射時の発熱を考慮してアルミニウム製熱媒体にあけた孔にターゲットを挿入し、これらをアルミニウム箔で包み照射用キャプセルに封入した。粉末のターゲットは、後にのべる特殊なターゲットを除いて、石英アンブルに封入するかあるいはこれをキャプセルに冷間圧接により封入後、照射用キャプセルに封入した。また特殊なターゲットである硫黄、二酸化テルル、窒化アルミニウムおよび酸化第二水銀については別扱いとし、硫黄についてはキャプセルに挿入したアルミニウム製熱媒体にあけた孔に硫黄粉末を挿入し、冷

間圧接封入後、照射用キャプセル³⁾に封入した。二酸化テルルはキャプセルに冷間圧接によって二重に封入しこれを照射用キャプセルに封入して三重包装とした。窒化アルミニウムは粉末状のターゲットは上述の粉末ターゲットと同様に石英アンプル封入としたが、ペレット状に成型焼結したターゲットはアルミニウム箔で包装後、照射用キャプセルに二重に封入した。酸化第二水銀は石英アンプルに封入後、ステンレス製キャプセル²⁾に熱溶接により封入し、これをキャプセルに冷間圧接により封入した。これをさらに照射用キャプセルに封入した。上記の金属や粉末のターゲットの場合には一番外側の照射用キャプセルについて、また特殊なターゲットについてはキャプセルおよび照射用キャプセルの全部を通して封入前にヘリウムによる置換を行ない密封後ヘリウム漏洩試験により気密度を確認した。

R I 試料の検査は材料試験炉部の定めた R I 試料検査基準にしたがって各試料について重量検査、もれ検査、寸法検査、印字検査および外観検査をおこなった。これらの検査を終了した試料は検査成績表を添付して提出された。

4 照 射

照射については、目的核種の生成のために最適と考えられる中性子エネルギー、必要中性子束および照射期間を定め、これについて製造部と材料試験炉部が詳細な打合せを行ない各照射用キャプセル毎に照射位置を定めた。

5 照射後試験および結果⁴⁾

照射後試験は、照射終了後に一番外側の照射用キャプセルまたはバスケットを J M T R のホットラボで切断し取出した試料を、東海研究所所在の R I 製造棟に搬入しておこなった。試験項目としては取扱いの難易、試料および包装の状態、目的核種の生成量に重点を置き、同時に照射したコバルト箱モニターによる熱中性子束の測定とともに直接測定の可能なものについてはそのまま測定を行ない、分離精製を要するものは化学処理をおこなった。生成量の測定は大部分の試料については絶対測定をおこなった標準試料をもちいて校正してある井戸型電離箱を使用して行なったが、一部の試料については Na I (Tl) 3 in ϕ \times 3 in グリスタルを用いて測定した γ 線スペクトルから求めた。また ^{60}Co 、 ^{192}Ir などの線源用 R I については電離箱で測定した線量率から換算して生成量を求めた。

上記の照射および照射後試験によって得られた結果の一例を第 5 - 1 表および第 5 - 2 表に示す。これらにも見られる様に照射試験のために選定した試料はいずれも当初予期した通りとくに問題なく照射をおこなうことができた。ターゲット種類別に試験結果についてのべると概略次の通りである。金属のターゲットについては、照射中の熱で溶融したスズを除いては照射後いずれの試料にも変化は見られず、予期したとおりの結果が得られた。粉末ターゲットでは塩化カリウムやクロム酸カリウムの様に照射によって変色するものはあったが、照射後通常の

溶解法では溶解しなくなる様なターゲットは酸化クロムを除いては見当らなかつた。特殊なターゲットである硫黄は照射中溶融してアルミニウム製熱媒体に固着し、二酸化テルルは変色してカプセル内面に一部融解して固着していたがいずれも照射前に予期した程度の変化でとくに問題はなかつた。また窒化アルミニウムターゲットは照射後ターゲットからの放出ガス量を調べたが、ガスの成分はいずれも空気であり安全上とくに問題となる様な量ではなかつた。酸化第二水銀についてもとくに安全上問題となるような変化は見られなかつた。

6 照射孔と中性子束

垂直照射孔および水送管の熱中性子束は上述の様に試料と同時にコバルト箔をモニターとして照射し、 ^{60}Co の生成量を測定して求めた。これらの値を50 MW運転時に換算して第6-1図に示す。またこれらの値を使用して各照射孔における50 MW運転時の各種R Iの比放射能の予想値をまとめて第6-1表に示す。

7 ま と め

JMTRの試用期間中に行なわれた照射試験については全期間中を通してすべての面で予想と大きく異なつたものはなく、いずれの試料も安全に照射されることがわかつた。50 MW運転時の長期間の実用照射のためには一部のターゲットについては照射中の挙動についてなお詳細な検討が必要であろうが、JMTRによるR I関係の照射技術は既に確立したといえる。

文中にしばしば述べたようにR Iの照射試験は計画立案の段階から製造部と材料試験炉部の関連諸課(計画課, 照射第1課, 照射第3課)との密接な協力の下に行なわれたものであることを再度強調しておきたい。

参考文献

- 1) 鴨志田誠, 田中勲, 高橋秀武, 松永朔郎; R I製造用キャプセルおよびラビット, 日本原子力学会年会, H 28 (1972)
- 2) 山林尚道, 小野間克行, 本石章司, 鈴木義雄; Hg-197, 203の製造(I)照射技術の開発, JAERI-memo(公開)4240 (1970)
- 3) 山林尚道, 岡根章五, 伊藤太郎; 原子炉照射用アルミニウム製試料容器の耐圧強度, 日本原子力学会年会, H-17 (1972)
- 4) アイソトープ事業部製造部; JMTR試用期間照射試験報告書(R I関係), JAERI-M(投稿中) (1973)

第2-1表 Target materials for Irradiation in JMTR.

Materials	Target materials and their properties						Objective radionuclides				Reactor Irradiation				
	Formula	Melting point (°C) ²⁾	Boiling point (°C) ²⁾	Specific gravity ²⁾	Solubility g/100g H ₂ O ²⁾	Thermal Conductivity at ~20°C (Cal·cm ⁻¹ ·sec ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Characteristics of materials			Nuclide	Half life ⁴⁾	Nuclear reaction of formation	Applications	Capsul. #	Remarks
							Form	Purity	Maker						
Gold	Au	1063	2660	19.3	insoluble	0.71	10mmφ wire	99.99%	Ishifuku Metal Industry Co., Ltd.	¹⁹⁸ Au	2.697d	(n, γ)	Medicine	67M-45R, 46R, 47R, 67M-48R, 49R, etc.	Hydro rabbit
Zinc	Zn	419.5	907	7.14	"	0.27	Grain	99.999%	Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd.	⁶⁵ Zn	2.45d	(n, γ)	Science Industry	67M-45R, 47R, 50R, 51R	
Nickel	Ni	1455	3177	8.90	"	0.22	0.5mm t Plate	99.99%	Johnson Matthey & Co., Ltd.	⁵⁸ Ni	125Y	(n, γ)	"	67M-45R, 47R, 50R, 53R	
Cobalt	Co	1492	3100	8.9	"	0.165	Foil Needle, Wafer	≥98.5%	Sumitomo special Metals Co., Ltd.	⁶⁰ Co	5.24Y	(n, γ)	Medicine Industry	70M-2R, 9R	Hydro rabbit
Tantalum oxide	Ta ₂ O ₅	1470	decomposition	8.735	"		Powder	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	^{182m} Ta	115.1d	(n, γ)	Science Industry	67M-45R, 47R, 50R	
Potassium chloride	KCl	776	1500	1.938	27.5 at 0°C		(crystalline powder)	Guaranteed Reagent	Kanto chemical Co., Ltd.	³⁵ S	87d	(n, p)	"	67M-45R, 47R, 51R, 52R	
Aluminum nitride	AlN	2200	decomposes 2450	3.05 at 25°C	insoluble		Powder Pellet	-	Radio Chemical Center	¹⁴ C	5568Y	(n, p)	"	67M-45R, 47R, 49R, 50R, 51R, 52R	
Samarium oxide	Sm ₂ O ₃		decomposes at 740	7.43 at 15°C	insoluble		Powder	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	^{152m} Eu	17Y	(n, γ)	Science	67M-46R, 48R	
Rubidium carbonate	Rb ₂ CO ₃	837	decomposes at 740	3.468	450 at 20°C		"	Specpure	"	⁸⁶ Rb	1866d	(n, γ)	"	"	
Cesium carbonate	Cs ₂ CO ₃	decomposition	610	4.11	260.5 at 15°C		"	Specpure	"	¹³⁴ Cs	2.07Y	"	Science Industry	67M-46R, 48R, 52R	
Chromium	Cr	1905	2200	7.1	insoluble	0.16	"	99.99%	Yokogawa Chemical Co., Ltd.	⁵¹ Cr	27.8d	"	Medicine	67M-46R, 48R	
Potassium chromate	K ₂ CrO ₄	975	decomposes at 18°C	2.732	58 at 0°C		crystalline powder	Guaranteed Reagent	Kanto Chemical Co., Ltd.	"	"	"	"	"	
Chromium oxide ¹⁾	Cr ₂ O ₃	1990	decomposition	5.21	insoluble		Powder	45.9% Cr	Oak Ridge National Laboratory	"	"	"	"	70M-2R, 9R	
Calcium carbonate	CaCO ₃	1339 at 1025 atm	decomposes at 825	2.71, 2.93	0.015 at 25°C		"	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	⁴⁵ Ca	164d	"	"	67M-46R, 48R, 49R, 50R, 51R, 52R	
Cadmium	Cd	320.9	767	8.642	insoluble	0.22	10mm t Plate	-	"	^{115m} Cd	43d	"	Medicine Science	67M-49R, 52R	
Silver	Ag	960.8	~2170	1.05	"	1.0	10mmφ wire	99.99%	Tanaka Kikiyoku Kogyo K. K.	^{110m} Ag	253d	"	Science Industry	67M-49R, 51R	
Molybdenum oxide	MoO ₃	795	sublimation	4.50 at 195°C	0.1086 at 18°C		Powder	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	⁹⁹ Mo	67.0h	"	Medicine	70M-2R, 8R, 9R	Hydro rabbit
Platinum	Pt	1773.5	4300	21.45	insoluble	0.17	0.5mmφ wire	-	Ishifuku Metal Industry Co., Ltd.	¹⁹⁹ Pt	314d	(n, γ)	Science	67M-50R	
Iron (■ oxide) ¹⁾	Fe ₂ O ₃	1535	3000	7.86 at 20°C	"	0.18	Powder	99.99%	Yokogawa Chemical Co., Ltd.	⁵⁹ Fe	260Y	(n, γ)	Science Industry	67M-53R, 24R	
Iron (■ oxide) ¹⁾	Fe ₂ O ₃	1565		5.24	"		"	82.48% Fe	Oak Ridge National Laboratory	⁵⁴ Mn	451d	(n, p)	"	70M-15R	
Tin	Sn	231.9	2270	6.52-6.56	"	0.16	Grain	99.99%	Mitsubishi Metal Mining Co., Ltd.	¹¹³ Sn	119d	(n, γ)	Medicine Industry	68M-23R, 24R	
Barium carbonate	BaCO ₃	α:1740 at 90 atm	decomposition	4.43	0.02 at 20°C		Powder	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	¹³¹ Ba	720Y	"	Medicine	67M-53R	
Iridium	Ir	2443	4400	22.421	insoluble	0.14	Pellet	99.99%	Ishifuku Metal Industry Co., Ltd.	¹⁹² Ir	7437d	"	Industry	68M-1E, 2R, 3R, 4R, 20R, 70M-2R, 9R	
Tellurium (■) oxide	TeO ₂		sublimes at 450	tetrag: 5.67 rhomb: 5.91	6.7×10 ⁻²⁰ in cold H ₂ O		Powder	Charanteed Reagent	Kanto Chemical & Co., Inc.	¹³¹ I	808d	(n, γ)	Medicine	68M-5R, 8R, 11R, 70M-8R, 9R	
Sulfur	S	114	444.6	1.92	insoluble		"	G.R. purified	"	³² P	14.22d	(n, p)	Agriculture	68M-9R, 10R, 11R, 70M-13R	
Mercury (■) oxide	HgO	decomposes at 500		11.14	0.05 at 25°C		"	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	¹⁹⁷ Hg	65h	(n, γ)	Medicine Industry	70M-15R	
Strontium carbonate ¹⁾	SrCO ₃	-CO ₂ : 1340 1497 at 60 atm		3.736	0.018 at 18°C		"	75.6% Sr	Oak Ridge National Laboratory	⁸⁵ Sr	47.3d	"	Science Industry	70M-15R	
Magnesium oxide	MgO	2800	3600	3.65	6.2×10 ⁻¹⁰		"	Specpure	Johnson Matthey & Co., Ltd.	²⁴ Na	14.97h	(n, p)	Science	0.25, 0.27, 0.29,	Hydro rabbit

1): Enriched target was used

2): Ed. Nihon Kagakukai: "KAGAKUBENRAN" The Maruzen Co., Ltd. Tokyo (1958)

3): Ed. Nihon Kinzokugakukai: "KINZOKUBENRAN" The Maruzen Co., Ltd. (1960)

4): Strominger D., Hollander J. M., and Seaborg G. T.; "Table of Isotopes" (Rev. Mod. Phys. 30 [2] (1958))

第5-1表 Results of the Irradiation of Zn Targets

Capsule No.	Cycle No.	RI Sample No.	Reactor hole	Irradiation period at 30MW	Target Weight (g)	Specific activity of ^{65}Zn (Ci/gZn)	Thermal neutron flux at 50MW ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)
67M-45R-2	3	1	M-6	16d 6h41min	0.0232	0.683	4.56×10^{14}
025	4	57	Hydro-Rabbit	22h45min	0.6816	—	8.34×10^{13}
67M-47R-2	5	8	M-6	18d 6h45min	0.0362	0.863	3.75×10^{14}
67M-50R-2	7	19	M-6	17d12h14min	0.0388	0.317	2.54×10^{14}
029	8	60	Hydro-Rabbit	10h 5min	0.5747	—	8.44×10^{13}
67M-51R-2	8~9	22	M-6	35d 7h13min	0.1517	1.35	4.40×10^{14}

* : ^{65}Zn was measured after the decay of $^{65,69\text{m}}\text{Zn}$.

第5-2表 Results of the Irradiation of Ni Targets

Capsule No.	Cycle No.	RI Sample No.	Reactor hole	Irradiation period at 30 MW	Target Weight (g)	Fast neutron flux obtained by the reaction $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ at 50MW ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)	
						σ : 1.05mb	σ : 92mb, Corrected value for burn up
67M-45R-2	3	1	M-6	16d 6h41min	1.0505	1.95×10^{13}	2.84×10^{13}
67M-47R-2	5	8	M-6	18d 6h45min	0.9797	2.04×10^{13}	2.91×10^{13}
67M-50R-2	7	19	M-6	17d12h14min	0.9465	3.05×10^{13}	5.20×10^{13}
67M-53R-3	7~9	29	J-7-1	53d17h 8min	0.1281	1.24×10^{13}	2.49×10^{13}

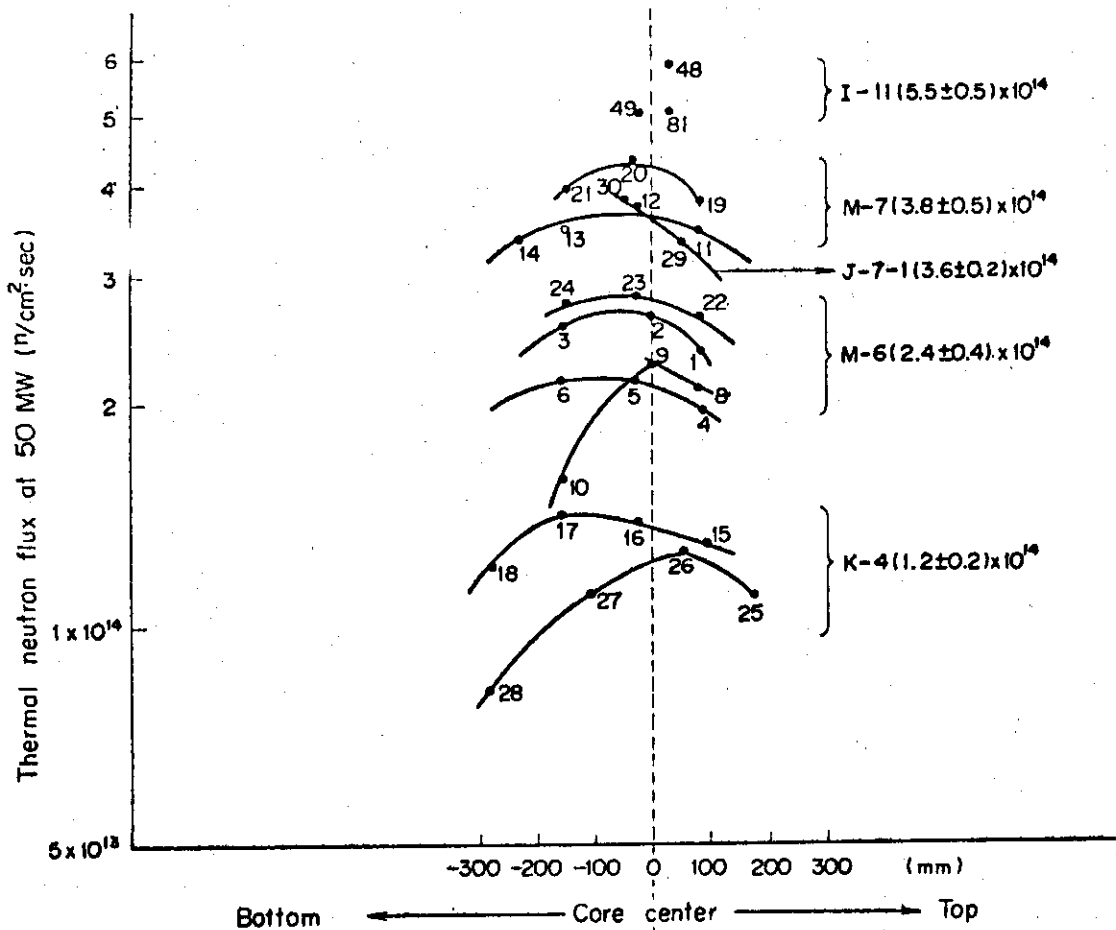
Specific Activities to be obtained by the Irradiation
 第6-1表 for 21 days at a 50MW Reactor Power, estimated from
 the Results of Test irradiation

Nuclide	Target material	Half-life	Specific activity (Ci/g elem.)	Thermal neutron flux ($n/cm^2 \cdot sec$)	Reactor Hole
^{32}P	S	14.22 d	30	$1.6^* \times 10^{14}$	J-7-1
^{35}S	KCl	87 d	2.0 Ci/KCl	2.2×10^{14}	M-6
^{51}Cr	K_2CrO_4	27.8 d	100	4.0×10^{14}	I-11
^{51}Cr	Cr**	27.8 d	300	4.0×10^{14}	I-11
^{45}Ca	$CaCO_3$	164 d	0.090	3.0×10^{14}	M-6
^{54}Mn	Fe	291 d	0.0050	$1.5^* \times 10^{14}$	I-11
^{59}Fe	Fe	45.1 d	0.100	4.5×10^{14}	I-11
^{58}Co	Ni	71.3 d	0.50	$2.5^* \times 10^{14}$	J-7
^{63}Ni	Ni	125 y	0.010	2.3×10^{14}	M-6
^{65}Zn	Zn	245 d	1.0	4.0×10^{14}	M-6
^{86}Rb	Rb_2CO_3	18.66 d	24	3.5×10^{14}	M-6
^{86}Rb	Rb_2CO_3	18.66 d	9.0	1.8×10^{14}	I-11
^{99}Mo	MoO_3	67.0 h	0.16	5.0×10^{13} (100h)	Hydro-Rabbit
^{99}Mo	MoO_3	67.0 h	1.2	1.2×10^{14}	K-4
^{110m}Ag	Ag	253 d	6.3	2.6×10^{14}	M-6
^{113}Sn	Sn	119 d	0.070	4.0×10^{14}	I-11
^{125}Sb	Sn	119 d	0.012	4.0×10^{14}	I-11
^{115m}Cd	Cd (~10 μ g)**	43 d	0.050	1.4×10^{14}	K-4
^{134}Cs	Cs_2CO_3	2.07 y	23	4.0×10^{14}	M-6
^{198}Au	Au	2.697 d	1800	2.3×10^{14}	M-6
^{198}Au	Au	2.697 d	800	1.0×10^{14}	K-4
^{199}Au	Au	315 d	150	3.0×10^{13} (100h)	Hydro-Rabbit
^{199}Au	Pt	315 d	(10)***	4.0×10^{14}	M-6
^{131}I	TeO_2	8.08 d	3.3 Ci/ TeO_2	5.0×10^{14}	I-11
^{155}Eu	Sm_2O_3	1.7 y	(~10)***	4.0×10^{14}	M-6
^{182}Ta	Ta_2O_5	115.1 d	18	4.0×10^{14}	M-6

* : Fast neutron flux ($n/cm^2 \cdot sec$)

** : Enriched in ^{50}Cr to 95.9%

*** : Calculated value



Capsule No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	48	49	81	Reactor hole
67M-45R	-	3	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(M-6)	
-46R	7	6	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	()	
-47R	-	10	9	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	()	
-48R	14	13	12	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(M-7)	
-49R	18	17	16	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(K-4)	
-50R	-	21	20	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(M-7)	
-51R	-	24	23	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(M-6)	
-52R	28	27	26	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(K-4)	
-53R	-	30	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(J-7-1)	
68M-23R	-	-	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(I-11)	
-24R	-	-	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	()	
70M- 8R	-	-	81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	()	

第 6 - 1 图 Axial distribution of thermal neutron flux at 50MW
(Measured with Co foil)

Fast neutron flux (n/cm²·sec) at 50MW

M-6-2 (2.9 ± 0.1) × 10¹³ n/cm²·sec (Ni(n,p)⁵⁸Co reaction, corrected value for burn up)

I-11-2 1.46 × 10¹⁴ (Fe(n,p)⁵⁴Mn reaction)

J-7-2 2.5 × 10¹⁴ (Ni(n,p)⁵⁸Co reaction)

Reactor hole Capsule position from the top of the hole.

む す び

試用期間の照射計画立案のため、当時のJ M T R運営委員会内に利用小委員会（委員長 三島良績東大教授）が設けられたのは昭和41年3月であり、実際J M T Rにおいて試用照射が開始されたのは昭和45年8月である。その後約1年間の照射を終えて、照射試料の東海ホットラボにおける照射後試験を完了したのは昭和48年夏であった。さらにこれらの結果をJ M T R利用協議会の第1部会（責任者 長谷川正義早大教授）においてとりまとめを終了したのは昭和48年末である。計画立案から致えて報告書作成迄に7年余を要したが、これら一連の諸作業を無事完了することが出来たのは一重に長期に渡って協力をいただいた所外各位の御尽力によるもので、此処に厚く御礼申上げると共に、照射試料を提供していただいた各社に謝意を表したい。またこれらの業務の遂行には材料試験炉部の全員が打って一丸となり、努力を重ねたことは勿論であるが、東海研究所の関係各室の方々の援助、特に東海研ホットラボ管理室の力に負う所が大きい。最後に参画された方々の氏名を記し、報告書発刊の喜びを分かちあっていたゞくと共に、今後J M T Rが試用期間の照射結果を踏み台として、益々照射技術の開発、確立に努力し、よって一般の御期待に沿えるよう奮うものである。

なお名簿については不備の点があれば御寛容いたゞきたい。

材料試験炉運営委員会名簿

41. 5.31

	氏 名	現 職
委員長	柳 下 昌 男	日本原子力研究所理事
委員長代理	平 山 省 一	日本原子力研究所、材料試験炉部次長
委 員	後 藤 秀 弘	東北大学教授
	向 坊 隆	東京大学教授
	三 島 良 績	東京大学教授
	長谷川 正 義	早稲田大学教授
	伊 藤 伍 郎	金属材料技術研究所第5部長
	鎌 田 稔	原子燃料公社東海製錬所長
	早 川 淳 一	原子力産業会議事務局長
	吉 岡 俊 男	日本原子力発電株式会社技術部長
	新 崎 正 治	住友原子力工業株式会社東京支社長
	森 川 辰 雄	日本原子力事業株式会社技術部長
	森 島 国 男	日立製作所原子力部長
	田 中 浩	古河電気工業株式会社中央研究所長
	横須賀 正 寿	三菱原子力工業株式会社取締役
中 井 敏 夫	日本原子力研究所理事	
宗 像 英 二	日本原子力研究所理事	

	氏 名	現 職
	阿 部 滋 忠	日本原子力研究所理事
	村 上 昌 俊	日本原子力研究所企画室長
	川 崎 正 之	日本原子力研究所本部調査役
	天 野 昇	日本原子力研究所東海研究所動力炉開発部長
	上 田 隆 三	日本原子力研究所東海研究所燃料開発部長
	百 田 光 雄	日本原子力研究所東海研究所研究部長
	宇 野 秀 郎	日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部長
	柴 田 長 夫	日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部長(新任)
オブザーバー	田 宮 茂 文	科学技術庁原子力局原子力開発機関監理官
幹 事	野 村 未 雄	日本原子力研究所材料試験炉部照射課長
	松 本 徳 太郎	日本原子力研究所材料試験炉部照射課長代理
	大 内 信 平	日本原子力研究所材料試験炉部実験計画課長
	阪 田 貞 弘	日本原子力研究所材料試験炉部原子炉課長
	野 中 正 治	日本原子力研究所材料試験炉部材料試験炉業務課長代理
	児 玉 敏 夫	日本原子力研究所材料試験炉部材料試験炉業務課事務係長

材料試験炉利用小委員会

41. 5. 31

	氏 名	現 職
小委員長	三 島 良 績	東京大学教授
委 員	長谷川 正 義	早稲田大学教授
	伊 藤 伍 郎	金属材料技術研究所第5部長
	森 島 国 男	日立製作所原子力部長
	平 山 省 一	日本原子力研究所材料試験炉部次長
専 門 委 員	矢 島 聖 使	東北大学金属材料研究所教授
	天 沼 倅	原子燃料公社東海製錬所主任研究員
	西 山 厚	住友電気工業株式会社熊取研究所技師長
	富 島 広	東京芝浦電気株式会社中央研究所研究主幹
	武 安 俊 彦	第一原子力グループ放射線研究所長
	関 義 辰	三菱原子力工業株式会社原子燃料部計画課長
	永 井 信 行	神戸製鋼所開発部主任部員
	西 垣 進	日本碍子株式会社研究所第3研究室長
	中 村 熙 栄	日本原子力研究所企画室調査役(課長)
沢 井 定	日本原子力研究所東海研究所動力炉開発部新型転換炉設計室長	

	氏 名	現 職
専 門 委 員	藤 村 理 入	日本原子力研究所東海研究所動力炉開発部構造強度研究室長
	長 崎 隆 吉	日本原子力研究所東海研究所燃料開発部材料研究室長
	武 谷 清 昭	日本原子力研究所東海研究所燃料開発部燃料照射第1研究室長
	八 剣 達 雄	日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部次長
	天 野 恕	日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部製造技術課長
	野 村 末 雄	日本原子力研究所材料試験炉部照射課長
	松 本 徳太郎	日本原子力研究所材料試験炉部照射課長代理
	大 内 信 平	日本原子力研究所材料試験炉部実験計画課長
	野 中 正 治	日本原子力研究所材料試験炉部材料試験炉業務課長代理(新任)
	児 玉 敏 夫	日本原子力研究所材料試験炉部材料試験炉業務課事務係長

材料試験炉運営委員会名簿

45. 11. 20

区 分	氏 名	役 職 名
委 員 長	川 崎 正 之	日本原子力研究所理事
委員長代理	村 上 昌 俊	日本原子力研究所大洗研究所長
学識経験者	向 坊 隆	東京大学工学部教授
	三 島 良 績	東京大学工学部教授
	長谷川 正義	早稲田大学理工学部教授
国公立機関	矢 島 聖 使	東北大学金属材料研究所教授
	鎌 田 稔	動力炉・核燃料開発事業団東海事業所長
	武 安 義 光	動力炉・核燃料開発事業団理事
	高 橋 菊 夫	原子力船開発事業団理事
産 業 界	藤 木 俊 三	新日本製鉄(株)副社長
	西 原 守	(株)神戸製鋼所中央研究所長
	片 山 三 郎	古河電気工業(株)原子力部長
	法 貴 四 郎	住友電気工業(株)常務取締役
	横須賀 正 寿	三菱原子力(株)取締役
	金 岩 芳 郎	東京芝浦電気(株)取締役 原子力本部長
	森 島 国 男	(株)日立製作所原子力部長
	畑 野 正	電力中央研究所理事第1技術研究所長
	森 一 久	日本原子力産業会議 事務局長
原 研	本 島 健 次	日本原子力研究所高崎研究所長
	上 田 隆 三	日本原子力研究所東海研究所副所長
	天 野 昇	日本原子力研究所企画室長
	大久保 一 郎	日本原子力研究所 R I 事業部長

原 研	八 劍 達 雄	日本原子力研究所材料試験炉部長
幹 事	野 村 末 雄	日本原子力研究所材料試験炉部次長
	大 内 信 平	日本原子力研究所材料試験炉部照射第1課長
	松 本 徳太郎	日本原子力研究所材料試験炉部ホットラボ課長
	落 合 甫	日本原子力研究所材料試験炉部材料試験炉業務課長
	大久保 義 春	日本原子力研究所材料試験炉部材料試験炉業務課長代理

材料試験炉利用協議会委員

47. 4. 11

氏 名	役 職 名	備 考
三 島 良 績	東京大学工学部教授	
長谷川 正義	早稲田大学理工学部教授	
矢 島 聖 使	東北大学金属材料研究所付属材料試験炉利用施設施設長	
小 山 武 雄	動力炉・核燃料開発事業団計画管理部長	
渡 辺 亮 治	金属材料技術研究所原子炉材料部長	
末 田 守	日本原子力産業会議事務局次長	
吉 田 道 一	日本鉄鋼協会技術部長	
三 宅 申	電気事業連合会原子力部長	
藤 井 勲	東京芝浦電気(株)総合研究所主任研究員	
松 本 政 吉	(株)日立製作所理事 電力事業本部副本部長	
薄 田 寛	三菱重工(株)技術本部神戸研究所材料研究室長	
西 山 厚	住友電気工業(株)熊取研究所長	
片 山 三 郎	古河電気工業(株)原子力部長	
永 井 信 行	(株)神戸製鋼所中央研究所第3研究室長	
近 藤 豊	住友金属工業(株)中央技術研究所主任研究員	
川 崎 正 之	原研理事 大洗研究所長	
八 劍 達 雄	原研大洗研究所材料試験炉部長	
野 村 末 雄	原研大洗研究所材料試験炉部次長	幹 事
大 内 信 平	原研大洗研究所材料試験炉照射第1課長	幹 事
松 本 徳太郎	原研大洗研究所材料試験炉ホットラボ課長	幹 事
落 合 甫	原研大洗研究所材料試験炉材料試験炉業務課長	幹 事

利用協議会第1部会

委員(取纏責任者)	長谷川 正義 (早 大)
委 員	三 島 良 績 (東 大)
委 員	矢 島 聖 使 (東 北 大)
委 員	薄 田 寛 (三 菱 重 工)

部会員(所外)	下川敬治	(新日鉄)
"	奥田哲也	(神戸製鋼)
"	大坪秀夫	(鉄鋼協会)
"	寺西洋志	(住友金属)
"	西田清利	(日本碍子)
"	小松純治	(動燃団)
"	富島 広	(東 芝)
"	水田三千雄	(三菱原子力)
"	鉄谷輝生	(原燃工)
"	古田敏郎	(古河電工)
"	収 英夫	(日 立)
部会員(所内)	武谷清昭	(動管室)
"	長崎隆吉	(燃工部)
"	藤村理人	(材工研)
"	本間俊二	(ホットラボ)
"	伊藤太郎	(RI製造部)
"	市川達生	(燃照研)

執筆者名簿(アイウエオ順)

Ⅳ Zr・制御材その他の材料の試用期間照射結果報告書

安部 勝洋	株式会社神戸製鋼所中央研究所
井川 征郎	三菱原子力工業株式会社研究所
石野 栗	東京大学工学部原子力工学科
大久保 延弘	日本冶金工業株式会社川崎製造所研究部
小川 豊	日本原子力研究所東海研究所
久保田 正	三菱原子力工業株式会社研究所
鉄谷 輝生	原子燃料工業株式会社技術部
寺西 洋志	住友金属工業株式会社中央技術研究所
西垣 進	日本碍子株式会社研究所
原 昭雄	株式会社日立製作所日立研究所
深瀬 幸重	日本冶金工業株式会社川崎製造所研究部
藤崎 幸雄	東京芝浦電気株式会社エネルギー機器研究所
本田 裕	三菱原子力工業株式会社研究所
三島 良績	東京大学工学部原子力工学科
目賀田 匡夫	原子燃料工業株式会社技術部
渡部 林二	原子燃料工業株式会社熊取製造所
松本 徳太郎	日本原子力研究所大洗研究所
相沢 作衛	日本原子力研究所大洗研究所

Ⅴ JMTRの試用期間照射結果報告書(大学関係)

茅野 秀夫	東北大学金属材料研究所付属JMTR利用施設
矢島 聖使	東北大学金属材料研究所付属JMTR利用施設

Ⅵ JMTRの試用期間照射結果報告書(RI関係)

伊藤 太郎	日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部
四方 英治	日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部

あ　と　が　き

以上それぞれの試験結果について詳細な報告が述べられたが、個々の試験結果については、計画が数年前におこなわれた、試料の数が非常に多かった、未経験のものも多数あった、試験方法の統一が出来てなかったものもあった、などにより種々問題点はあるが、これらの条件をよく承知して頂けば、有用な照射結果や、照射試験結果も数多くあると思われるので、有効に利用して頂けば幸いである。尚大学関係の試験結果の詳細は、東北大学金属材料研究所付属材料試験炉利用施設共同利用研究経過報告書および各関係研究機関で発表されている。RI関係の詳細は、JAERI-M 5363 にのべられている。

本試験計画は長期にわたり行なわれ終始この作業に御尽力下さった関係者各位に深く感謝する次第である。