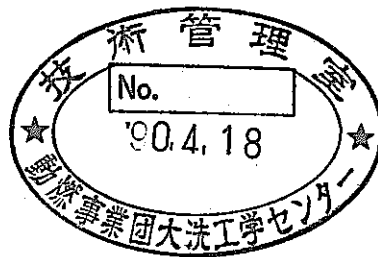


分置

「常陽」MK-II炉心C型特殊燃料集合体PF C020の照射後試験

燃料被覆管の透過型電子顕微鏡観察



1989年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
燃料材料開発部

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

「常陽」MK-II炉心C型特殊燃料集合体PFC020の照射後試験

燃料被覆管の透過型電子顕微鏡観察

芳 中 一 行^{*}，石川 敬 二^{*}，小野 瀬 庄 二^{*}
久 木 田 真 平^{*}，両 角 勝 文^{**}，柴 原 格^{*}

要 旨

C型特殊燃料集合体PFC020は「常陽」MK-II炉心（炉心内位置3A2）において第3サイクル～第11サイクルまで照射（集合体平均燃焼度54,100MWD/t）された。この燃料ピンに用いられた55年試作材の「もんじゅ」実機相当燃料被覆管（改良SUS316鋼，化学成分の異なる2鋼種；55MK材，55MS材）について，微量元素が及ぼす強度及びスエリング等への影響を調べることを目的とした照射後試験が計画されている。これらの試験の一環として，照射による微量元素が及ぼす微細組織の変化について，エネルギー分散型X線分析装置を備えた200KV透過型電子顕微鏡を用いて観察を実施した結果，以下のことが明らかになった。

尚，55年試作材の微細組織の観察は，本報が初めてのものである。

- (1) ボイドは 7.7×10^{22} n/cm² (E > 0.1MeV)以上照射された試料に観察された。55MK材に比べ55MS材に多くのボイドが観察された。また，Heバルブについても，55MK材に多く観察された。これは，微量添加元素（Ti，Nb）量の違いによりHeのトラップサイトとなるMC相の量に違いを生じたためと考えられる。
- (2) 全転位密度は照射温度の上昇に伴い減少する傾向がある。また，フランクループは少数ではあるが，Ti，Nbを添加しない従来のSUS316鋼（50年度試作材）に比べ580℃の高温でも存在していた。
- (3) 55MK材，55MS材の析出挙動はほぼ同じであり，MC相，M₆C相，M₂₃C₆相，G相，Laves相，針状相の各析出相が観察された。

* 大洗工学センター 燃料材料開発部 照射材料試験室

** 現大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料試験室

目 次

1. まえがき	1
2. 供試材	2
3. 照射条件	3
4. 試験方法	4
4.1 試料調製	4
4.2 TEMによる観察	4
4.3 光学顕微鏡による観察	5
5. 試験結果	6
5.1 ボイドの観察	6
5.2 転位組織の観察	6
5.3 析出相の観察	6
5.4 光学顕微鏡による観察及び硬度測定	7
6. 結果の検討	8
7. ま と め	9
8. 参考文献	10

図表及び写真のリスト

- 表 1. PFC020 被覆管及び PhenixP-4 被覆管の化学成分
- 表 2. 照射条件
- 表 3. PFC020 被覆管のポイドスエリング
- 表 4. PFC020 被覆管の転位密度
- 表 5. PFC020 被覆管の析出相
- 表 6. PFC020 被覆管のビッカース硬さ
- 図 1. 「常陽」MK-II 炉心における C 型特殊燃料集合体 PFC020 の装荷位置
- 図 2. 燃料ピンの位置
- 図 3. 燃料被覆管の照射条件
- 図 4. ポイドスエリングと中性子照射量の関係
- 図 5. 転位密度と照射温度の関係
- 図 6. ビッカース硬さと転位密度の関係
- 図 7. 針状相の析出とスエリングの関係
- 写真 1. PFC020 被覆管に観察されたポイド
- 写真 2. PFC020 被覆管 (55MK 材) の転位分布
- 写真 3. PFC020 被覆管 (55MS 材) の転位分布
- 写真 4. A4314 (8.6×10^{22} n/cm², 528°C; 55MK 材) に観察された析出相
- 写真 5. A4316 (7.7×10^{22} n/cm², 580°C; 55MK 材) に観察された析出相
- 写真 6. A4318 (4.9×10^{22} n/cm², 614°C; 55MK 材) に観察された析出相
- 写真 7. A4304 (8.7×10^{22} n/cm², 528°C; 55MS 材) に観察された析出相
- 写真 8. A4306 (7.7×10^{22} n/cm², 580°C; 55MS 材) に観察された析出相
- 写真 9. A4308 (5.3×10^{22} n/cm², 614°C; 55MS 材) に観察された析出相
- 写真 10. PFC020 被覆管 (55MK 材) の金相写真
- 写真 11. PFC020 被覆管 (55MS 材) の金相写真

1. ま え が き

「もんじゅ」実機相当の燃料被覆管（改良SUS316鋼）として試作された化学成分が異なる2鋼種（55MK材，55MS材）の照射挙動を調査することを目的として，「常陽」MK-II炉心で最高 8.7×10^{22} n/cm²（ $E > 0.1$ MeV）まで照射されたC型特殊燃料集合体PFC020のMMFにおける照射後試験が計画された。本報告は，この計画の一環として昭和63年4月より昭和63年8月にかけて実施した被覆管の透過型電子顕微鏡（以下「TEM」と略す）及び光学顕微鏡による微細組織観察の結果をまとめたものである。

TEM観察はボイドの分布状態，転位の分布状態，及び析出物の析出状態とその同定を目的とし，光学顕微鏡観察は，析出物の分布状態を調べるために実施した。

2. 供 試 材

PFC020 燃料被覆管は約20%の冷間加工を施した改良SUS316ステンレス鋼であり、神戸製鋼製（以下「55MK材」という）及び、住友金属製（以下「55MS材」という）の2種類よりなる。

両材の化学成分は表1に示すように、Ti、Nbの添加量が若干異なり、ともに55MS材の方が多い。表1には比較のために、55MS材とほぼ同じ化学組成で最高 $1.8.9 \times 10^{22}$ n/cm²までPhenix P-4で照射されたもののデータも添えている。また、それぞれの材料の製造履歴も併記している。

3. 照射条件

C型特殊燃料集合体PFC020の装荷位置及び試料を採取した燃料ピンの集合体内位置をそれぞれ図1、図2に示す。

C型特殊燃料集合体PFC020は炉心内位置3A2において100MWt出力第3サイクル(昭和59年4月)より第11サイクル(昭和61年1月)まで(E.F.P.D.約400日)照射された。なお、本集合体の平均燃焼度は54100MWD/Tである。

TEM観察試料は表2に示すように照射量 $4.9 \sim 8.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$,以下照射量は特に指定しない場合は $E > 0.1 \text{ MeV}$ を指す),照射温度 $528^\circ\text{C} \sim 614^\circ\text{C}$ で照射された。55MK材,55MS材の試料は燃料ピンのほぼ同一位置で採取しており,照射条件はほぼ同じである。照射温度(運転監視コード“MAGI”による計算値)は,照射初期と照射末期で最大約 30°C の差があるがデータの整理にはその平均値を用いた。(図3参照)

4. 試 験 方 法

4.1 試料調製

燃料を除去し、洗浄された23mm長の被覆管より15mm長の試料を切り出し、さらにそれを半割りにしたものをTEM観察用試料とした。また、光学顕微鏡観察用試料としてはその残り約8mm長のものを使用した。

(1) TEM試料

切断されたTEM観察用試料から、被覆管肉厚中心位置で薄膜試料を得るために、まず適当な厚さ(0.15~0.2mm)まで化学研磨した。

化学研磨は次の溶液によって行った。

塩 酸	50 vol%
硝 酸	10 vol%
リン酸	5 vol%
水	35 vol%

化学研磨終了後、3mm径に機械的に打ち抜いた。この3mm径、0.15~0.2mm厚さの試料をツイングレット法にて薄膜試料とした。ツイングレット法の研磨液及び条件を以下に示す。

電解研磨液	過塩素酸	5 vol%
	酢 酸	95 vol%
電解研磨条件	電 圧	70V
	電 流	0.10~0.15 A
	液 温	15℃

また、レプリカ試料の採取は一段レプリカ法によって行った。採取方法を以下に示す。

- 1) 試料表面を鏡面に仕上げる。
- 2) 電解エッチングを行う。
- 3) 真空蒸着装置でカーボンを30~40nm蒸着する。
- 4) カーボン膜を剥離し、銅メッシュに固着させる。

(2) 光顕試料

光学顕微鏡用試料は切断された試料をエポキシ樹脂に埋め込み、エメリー紙で研磨した後、10%過硫酸アンモニア水溶液で電解エッチングを行って作製した。

4.2 TEMによる観察

エネルギー分散型X線分析装置(EDX)を取り付けた透過走査型電子顕微鏡(日立:H700H)によって加速電圧200kVで観察を行った。

ボイドの観察は透過像によって行い、その観察倍率は30000倍程度とした。

3. 照射条件

C型特殊燃料集合体PFC020の装荷位置及び試料を採取した燃料ピンの集合体内位置をそれぞれ図1、図2に示す。

C型特殊燃料集合体PFC020は炉心内位置3A2において100MWt出力第3サイクル(昭和59年4月)より第11サイクル(昭和61年1月)まで(E.F.P.D.約400日)照射された。なお、本集合体の平均燃焼度は54100MWD/Tである。

TEM観察試料は表2に示すように照射量 $4.9 \sim 8.7 \times 10^{22}$ n/cm² (E>0.1MeV,以下照射量は特に指定しない場合はE>0.1MeVを指す),照射温度528℃~614℃で照射された。55MK材,55MS材の試料は燃料ピンのほぼ同一位置で採取しており,照射条件はほぼ同じである。照射温度(運転監視コード“MAGI”による計算値)は,照射初期と照射末期で最大約30℃の差があるがデータの整理にはその平均値を用いた。(図3参照)

4. 試験方法

4.1 試料調製

燃料を除去し、洗浄された23mm長の被覆管より15mm長の試料を切り出し、さらにそれを半割りにしたものをTEM観察用試料とした。また、光学顕微鏡観察用試料としてはその残り約8mm長のものを使用した。

(1) TEM試料

切断されたTEM観察用試料から、被覆管肉厚中心位置で薄膜試料を得るために、まず適当な厚さ(0.15~0.2mm)まで化学研磨した。

化学研磨は次の溶液によって行った。

塩酸	50 vol%
硝酸	10 vol%
リン酸	5 vol%
水	35 vol%

化学研磨終了後、3mm径に機械的に打ち抜いた。この3mm径、0.15~0.2mm厚さの試料をツイジェット法にて薄膜試料とした。ツイジェット法の研磨液及び条件を以下に示す。

電解研磨液	過塩素酸	5 vol%
	酢酸	95 vol%
電解研磨条件	電圧	70V
	電流	0.10~0.15A
	液温	15℃

また、レプリカ試料の採取は一段レプリカ法によって行った。採取方法を以下に示す。

- 1) 試料表面を鏡面に仕上げる。
- 2) 電解エッチングを行う。
- 3) 真空蒸着装置でカーボンを30~40nm蒸着する。
- 4) カーボン膜を剥離し、銅メッシュに固着させる。

(2) 光顕試料

光学顕微鏡用試料は切断された試料をエポキシ樹脂に埋め込み、エメリー紙で研磨した後、10%過硫酸アンモニア水溶液で電解エッチングを行って作製した。

4.2 TEMによる観察

エネルギー分散型X線分析装置(EDX)を取り付けた透過走査型電子顕微鏡(日立:H700H)によって加速電圧200kVで観察を行った。

ポイドの観察は透過像によって行い、その観察倍率は30000倍程度とした。

転位については、反射波 $g = \langle 111 \rangle$ 又は $\langle 200 \rangle$ の二波条件を満足する透過像（明視野像）で観察し、転位密度の測定は暗視野像より Guttman の交切解析法⁽¹⁾に基づいて行った。

析出物については透過像によって分布状態を調べ、制限視野回折（SAD）によってその同定を行った。さらに抽出レプリカ法にて採取した析出物の金属成分の定量分析をEDXによって行った。

4.3 光学顕微鏡による観察

光学顕微鏡（ライヘルト社製テラトーム）による組織観察は析出物の分布状態を調べるために実施した。観察は100倍及び400倍で行い、あわせて硬さの測定を実施した。

5. 試験結果

5.1 ボイドの観察

PFC020被覆管に観察されたボイドのTEM写真(明視野像)を写真1に示す。また、その定量結果を表3に示す。

ボイドは、55MK材においては照射量 7.7×10^{22} n/cm²以上の2試料に、55MS材においては 8.7×10^{22} n/cm²まで照射された1試料に観察された。また、数密度についても同様に55MK材に比較的多くのボイドが観察されている。最も数多くボイドが観察された試料(55MK材： 8.6×10^{22} n/cm²，528℃)のボイドスエリング量は0.03%であり、スエリングの潜伏期にある。なお、ボイドがほとんど観察されなかった55MS材と化学成分がほぼ等しい材料をPhenix炉で $\sim 1.85 \times 10^{22}$ n/cm²まで重照射(P-4照射)した結果ではボイドスエリングが最大0.4%となっている。

また、Heバブルと推定される微小キャビティの発生がすべての試料において観察された。その数密度についてはボイドと同様に、55MS材に比べいずれの条件においても55MK材に多く観察された。両材ともに照射量が比較的高く、照射温度も高い 7.7×10^{22} n/cm²，580℃の条件で照射された試料にHeバブルは数多く観察された。なお、Heバブルは主として針状析出相の界面に観察された。

5.2 転位組織の観察

転位組織の暗視野像を写真2，写真3に、転位密度の測定結果を表4に、その照射温度との関係を図5に示す。

全転位密度はこれまでの「もんじゅ」燃料被覆管試作材(47MS材，47MK材，50MS材，50MK材)と同様に照射温度の上昇に伴い減少するが、全転位密度の値としてはそれらの材料に比べ若干大きめとなっている。

また、フランクループは両材とも、照射温度が528℃と580℃の試料に観察された。これはこれまでの「もんじゅ」試作材の結果(~ 520 ℃)と比較すると、高温までフランクループが存在していることになる。なお、その数密度について両材を比較すると、580℃においては $2 \sim 3 \times 10^{13}$ /cm³とほぼ同じであるが、528℃では55MK材にかなり多くのフランクループが観察(1.7×10^{14} /cm³)されている。

5.3 析出相の観察

観察された析出相のTEM写真(明視野像)を写真4～写真9に示す。また、結晶粒内及び結晶粒界に観察された析出相を表5に示す。

高速炉照射されたSUS316ステンレス鋼中に、MC相，M₆C相，M₂₃C₆相，G相，Laves

相等の析出相が観察されることはよく知られている⁽²⁾⁽³⁾。55MS材、55MK材においてもこれらの析出相が観察された。両材に観察されたLaves相は主にMC相を核として形成されていた。また、これらの析出相の他にリン化合物と考えられる針状の析出相が確認されており、その界面にはHeバブルと思われる微小なキャビティが観察される。

ポイド、転位組織でみられたような両材の照射挙動の違いは、析出相についてはみられなかった。

5.4 光学顕微鏡による観察及び硬度測定

写真10、写真11に55MK材、55MS材の光学顕微鏡写真を示す。また、硬度測定結果を表6に示す。

光学顕微鏡観察の結果、両材ともに被覆管外面に比べ内面側で析出物の量が多くなっていたが、その傾向は55MK材において顕著であった。また、ビッカース硬さ値は照射温度の上昇（転位密度の減少（図8参照））に伴って小さくなる傾向があるが、580℃を越えると低下傾向は飽和する。なお、両材における硬さ値はほぼ同じであった。

6. 結果の検討

核変換によって生じたHeの存在によってボイドの核生成は助長される⁽⁴⁾。55MK材は55MS材と比較すると、ボイドと同様にHeバブルも多く認められた。55MK材、55MS材の化学成分はほぼ同じであり、マトリクス中のHe生成量はほぼ同等であると推定されることから、55MK材は55MS材と比較してHeガスがTEMで確認できるバブルへと成長する確率が大きいことが考えられる。

HeガスはMC相等の析出物の界面、転位等にトラップされる⁽⁴⁾。55MK材は55MS材と比較しMC相の構成元素であるTi, Nbの添加量が少ない。このため、55MKでは、HeのトラップサイトとなるMC相の量が少なく、マトリクス中のHeガス濃度が上昇し、電子顕微鏡で観察できるまでHeバブルが成長した結果、Heバブルが数多く確認されたと考えることができる。

また、Heバブルがボイドの成長を助長するには、ある程度の大きさが必要なことから、TEMで確認できるHeバブルが多い55MK材にボイドが比較的多く発生したと考えられる。

しかし、本試験結果においては55MK材、55MS材の析出挙動に大きな違いが認められていない。これはHeをトラップしたMC相が微細であるためにTEM像として確認されなかったものと考えられる。

また、本試験結果と、これまでの「もんじゅ」試作材(50MS材、50MK材)の結果を比較すると、前者の方ガスエリングが小さい(図7参照)。この挙動の違いは前述と同様に析出挙動の違いによって説明することができる⁽⁵⁾。すなわち、両者ともに針状析出相が観察されている試料ではエリングが小さく、針状析出相が観察されていない試料でエリングが大きいことから、針状析出相がHeのトラップサイトとなり、エリングを抑制していると考えられる。

7. ま と め

「もんじゅ」実機相当の被覆材2種類（55MK材，55MS材）の照射挙動を調べることを目的として「常陽」で最高 $8.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射されたC型特殊燃料集合体 PFC020 の燃料被覆管について透過型電子顕微鏡観察を行った結果，次のことが明らかになった。

- (1) ボイドは $7.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) 以上照射された試料に観察された。55MS材に比べ55MK材に多くのボイドが観察された。また，Heバブルについても55MK材に多く観察された。これは，微量添加元素（Ti，Nb）量の違いによりHeのトラップサイトとなるMC相の析出量に差が生じ，それが影響していると考えられる。
- (2) 全転位密度は照射温度の上昇に伴い減少する傾向がある。また，フランクグループは少数（ $\sim 3 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ ）ではあるがTi，Nbを添加しない従来材料に比べ580℃の高温でも存在していた。
- (3) 55MS材，55MK材の析出挙動はほぼ同じであり，MC相， M_6C 相， $M_{23}C_6$ 相，G相，Laves相，針状相の各析出相が観察された。
- (4) ビッカース硬さは，照射温度の上昇に伴って減少する傾向にあり，両材でほぼ同じであった。

8. 参 考 文 献

- (1) P. B. Hirsch, A. Howie, R. B. Nicholson, D. W. Pashley, M. J. Whelan :
ELECTRON MICROSCOPY OF THIN CRYSTALS (1965)
- (2) Eal H. Lee, P. J. Maziasz, A. F. Rowcliffe : THE STRUCTURE AND
COMPOSITION OF PHASES OCCURRING IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS
IN THERMAL AND IRRADIATION ENVIRONMENTS
- (3) 小野瀬庄二他：Rapsodie PNC-4.5 燃料の照射後試験（燃料被覆管の透過型電子顕微鏡観察），
PNC N9410 87-092
- (4) 井形直弘：核融合炉材料（培風館）
- (5) 立石嘉徳他：高速炉炉心材料用改良 SUS316 ステンレス鋼の開発，日本原子力学会誌
Vol. 30

表 1. PFC020 被覆管及び Phenix P-4 被覆管の化学成分及び製造履歴

鋼種 (Lot No.)	ピン No	製造履歴		化 学 成 分 (wt%)																
		熱処理 温度(℃)	冷間加 工度(%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	B	N	Al	As	Cu	Nb+Ta	V	Ti
55MK材 (K557:PFC020)	A431	1040	20	0.051	0.76	1.71	0.025	0.005	13.45	16.50	0.01	2.34	0.0030	0.005	0.013	<0.002	0.01	0.046	<0.01	0.070
55MS材 (S553:PFC020)	A430	1085	19	0.048	0.93	1.78	0.031	0.004	13.81	16.60	0.005	2.51	0.0044	0.0075	0.040	0.002	0.002	0.073	0.002	0.098
55MK材 (K554:Phenix P-4)	—	1080	20	0.052	0.82	1.83	0.028	0.009	13.84	16.52	0.01	2.49	0.0031	0.003	—	—	—	Nb 0.079	—	0.080
55MS材 (S554:Phenix P-4)	—	1085	19	0.047	0.92	1.74	0.030	0.004	13.74	16.50	0.005	2.50	0.0039	0.0077	—	—	—	Nb 0.070	—	0.097

表 2 照射条件

試料 No.	鋼種 (Lot No)	D. F. P. B* (mm)	照射量 ($\times 10^{22}$ n/cm ²) (E>0.1MeV)	照射温度 (℃)
A 4 3 0 4	5 5 MS材 (S553)	6 4 1 ~ 6 6 4	8.7	5 2 8
A 4 3 0 6		7 6 5 ~ 7 9 0	7.7	5 8 0
A 4 3 0 8		8 8 5 ~ 9 0 9	5.3	6 1 4
A 4 3 1 4	5 5 MK材 (K557)	6 4 1 ~ 6 6 4	8.6	5 2 8
A 4 3 1 6		7 6 5 ~ 7 9 0	7.7	5 8 0
A 4 3 1 8		8 8 5 ~ 9 1 1	4.9	6 1 4

* ピン下端からの距離

表3 PFC020被覆管のボイドスエリング

試料 No.	鋼種 (Lot No.)	照射量 ($\times 10^{22}$ n/cm ²) (E>0.1MeV)	照射温度 (℃)	ボ イ ド			Heバブル 数密度 ($\times 10^{14}$ /cm ³)
				数密度 ($\times 10^{14}$ /cm ³)	平均径 (nm)	スエリング (%)	
A 4 3 0 4	5 5 MS材 (S553)	8.7	528	V. L *	—	V. L *	0.21
A 4 3 0 6		7.7	580	—	—	—	0.83
A 4 3 0 8		5.3	614	—	—	—	V. L *
A 4 3 1 4	5 5 MK材 (K557)	8.6	528	0.21	27	0.03	0.73
A 4 3 1 6		7.7	580	V. L *	—	V. L *	9.7
A 4 3 1 8		4.9	614	—	—	—	1.6

* V. L = Very Low

表4 PFC020被覆管の転位密度

試料 No	鋼種 (Lot No)	照射量 ($\times 10^{22} \text{ n/cm}^2$) ($E > 0.1 \text{ MeV}$)	照射温度 ($^{\circ}\text{C}$)	フランクグループ			全転位密度 *1 ($\times 10^{10} \text{ cm/cm}^3$)
				数密度 ($\times 10^{14} / \text{cm}^3$)	平均値 (nm)	ループ転位密度 ($\times 10^{10} \text{ cm/cm}^3$)	
A 4 3 0 4	5 5 M S 材 (S 5 5 3)	8.7	5 2 8	V. L *2	—	V. L *2	4.5
A 4 3 0 6		7.7	5 8 0	0.2	5 2	0.0 4	3.7
A 4 3 0 8		5.3	6 1 4	—	—	—	3.7
A 4 3 1 4	5 5 M K 材 (K 5 5 7)	8.6	5 2 8	1.7	5 8	0.3	4.3
A 4 3 1 6		7.7	5 8 0	0.3	4 1	0.0 7	3.9
A 4 3 1 8		4.9	6 1 4	—	—	—	3.0

*1 全転位密度 = 転位ループ + 転位網

*2 V. L = Very Low

表5 PFC020被覆管の析出相

試料	材料	照射温度 (℃)	照射量* ($\times 10^{22}$ n/cm ²)	析出相	
				粒界	粒内
A 4 3 0 4	5 5 M S 材	5 2 8	8. 7	M ₆ C M ₂₃ C ₆	M ₆ C MC M ₂₃ C ₆ 針状相
A 4 3 0 6		5 8 0	7. 7	M ₆ C M ₂₃ C ₆ G相	MC G相 M ₆ C 針状相 M ₂₃ C ₆
A 4 3 0 8		6 1 4	5. 3	M ₂₃ C ₆ Laves相	M ₂₃ C ₆ MC Laves相+MC Laves相 針状相 M ₆ C
A 4 3 1 4	5 5 M K 材	5 2 8	8. 6	M ₆ C M ₂₃ C ₆	MC 針状相 M ₆ C M ₂₃ C ₆
A 4 3 1 6		5 8 0	7. 7	M ₆ C M ₂₃ C ₆ G相	M ₆ C 針状相 M ₂₃ C ₆ G相
A 4 3 1 8		6 1 4	4. 9	M ₆ C M ₂₃ C ₆ Laves相	M ₆ C MC M ₂₃ C ₆ Laves相+MC Laves相

* E > 0.1 MeV

表6 PFC020被覆管のビッカース硬さ

試料No	鋼種 (Lot No)	照射量 ($\times 10^{22} \text{ n/cm}^2$) ($E > 0.1 \text{ MeV}$)	照射温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ビッカース硬さ (H.V)
A4304	55MS材 (S553)	8.7	528	302
A4306		7.7	580	266
A4308		5.3	614	259
A4314	55MK材 (K557)	8.6	528	301
A4316		7.7	580	262
A4318		4.9	614	260

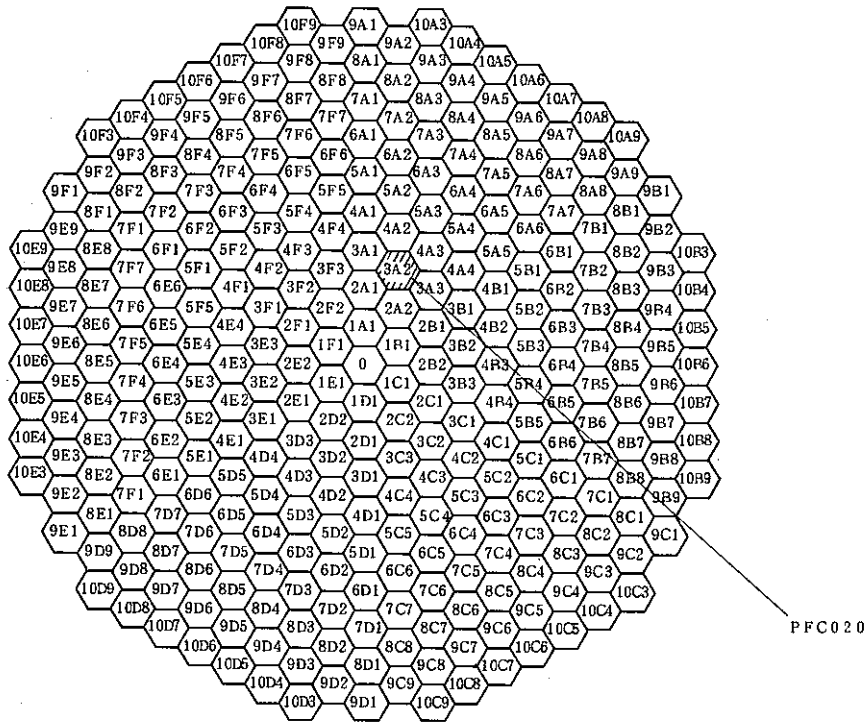
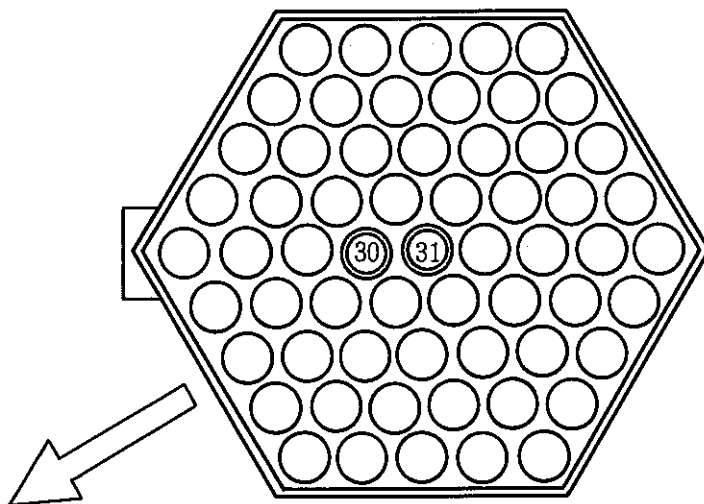


図 1. 「常陽」MK-II 炉心における C 型特殊燃料集合体 PFC020 の装荷位置



炉心方向

図 2 燃料ピンの位置 (30 : ピン No A 4 3 0 , 31 : ピン No A 4 3 1)

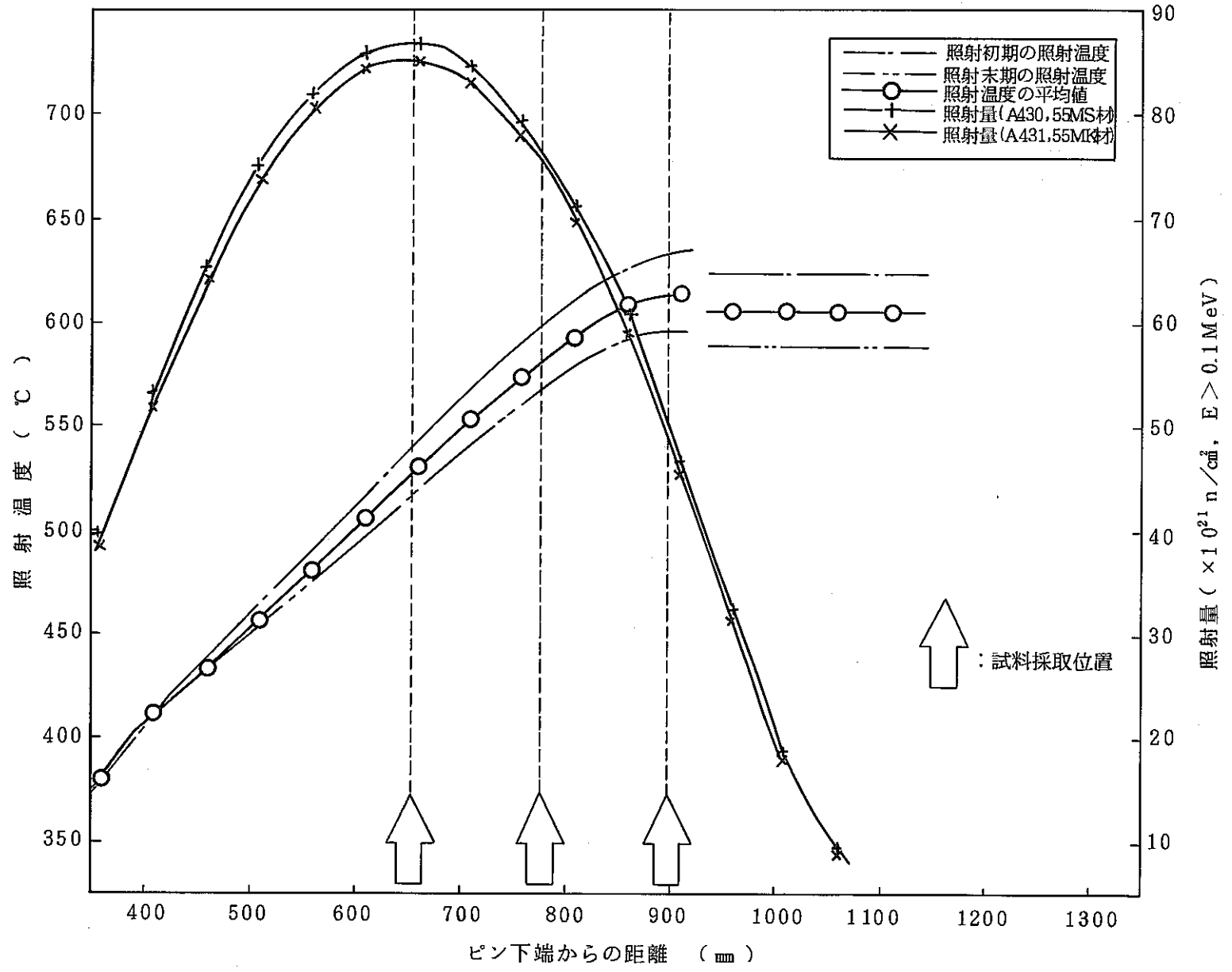


図3. 燃料被覆管の照射条件

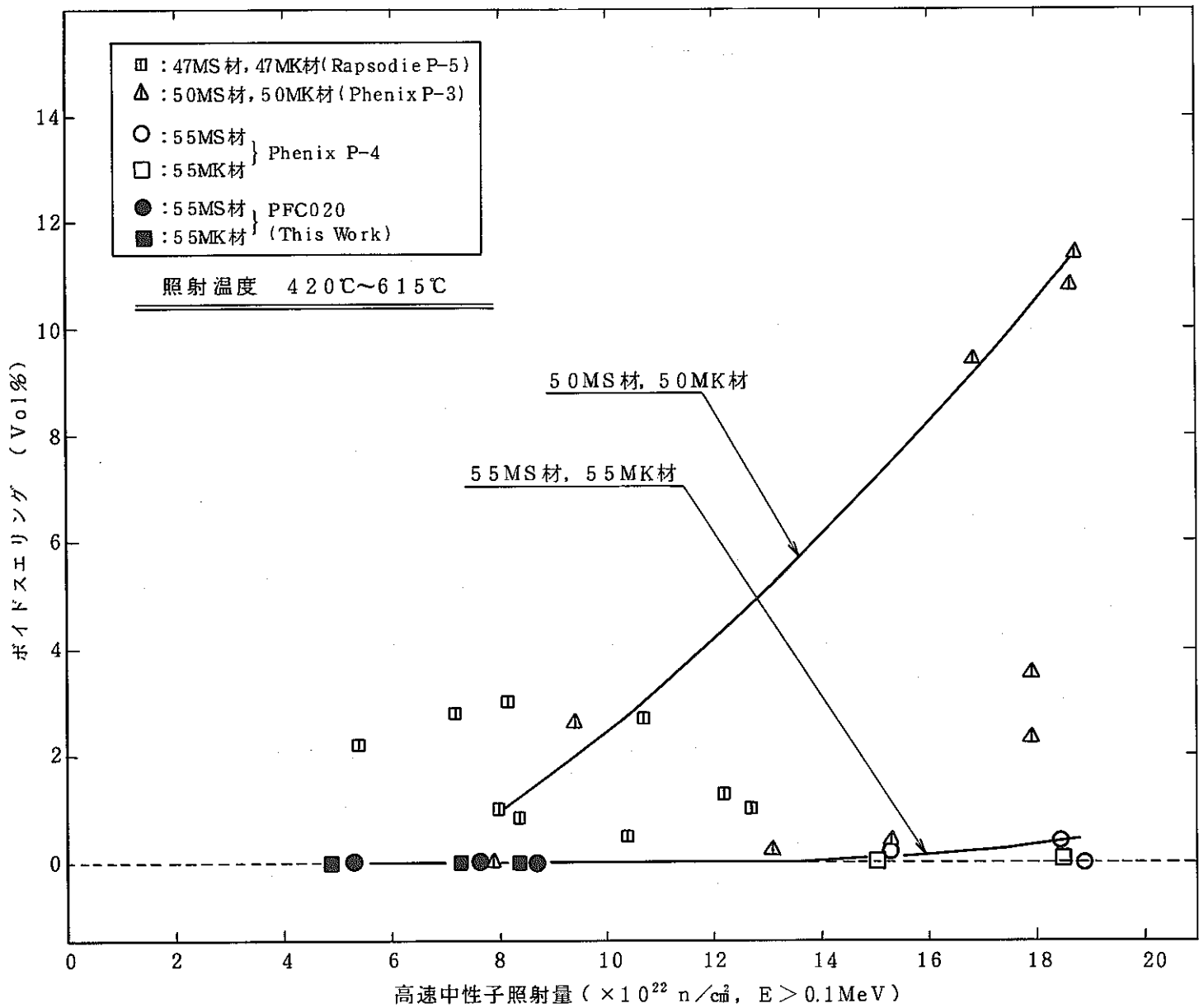


図4. ボイドスエリングと中性子照射量の関係

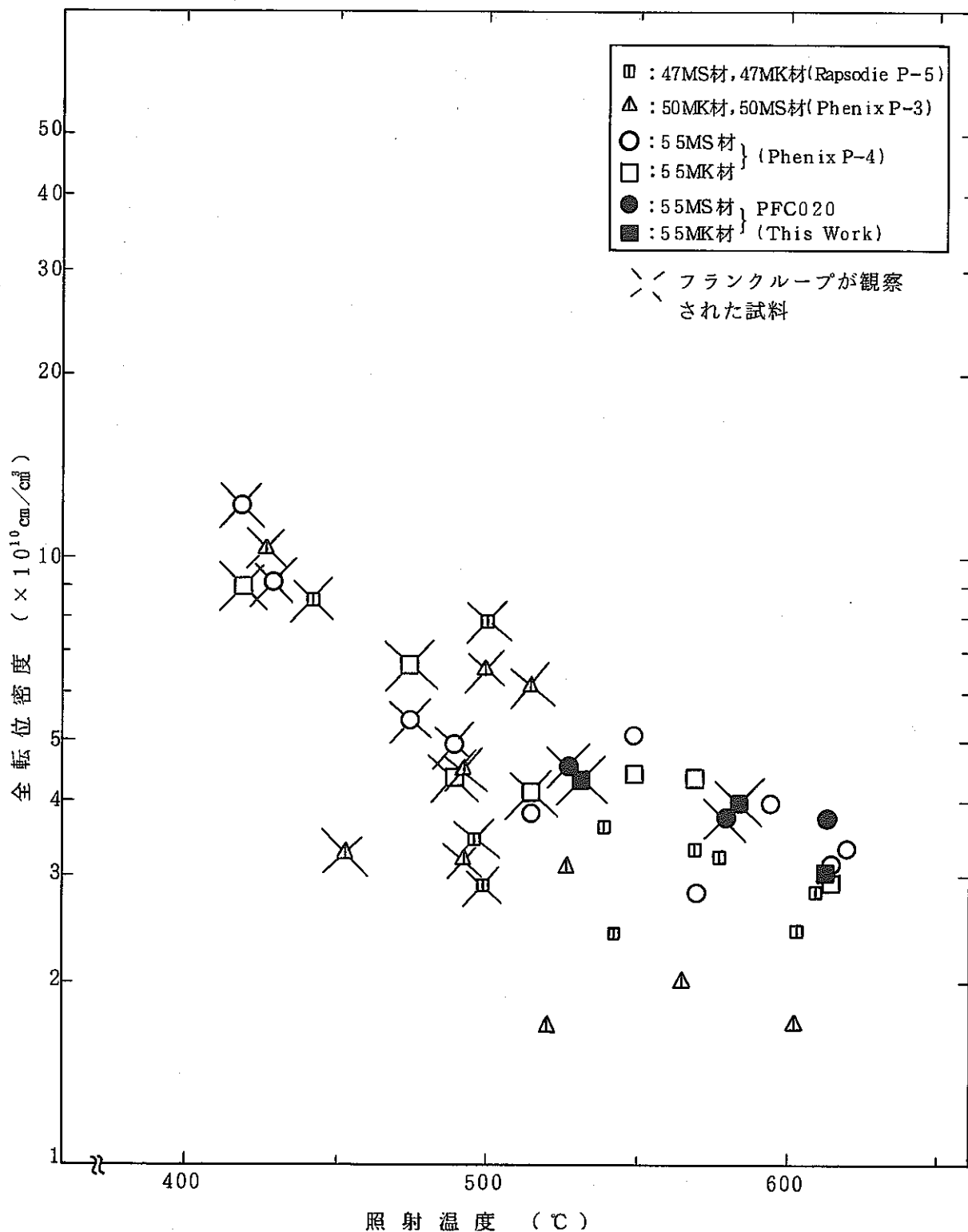


図5. 転位密度と照射温度の関係

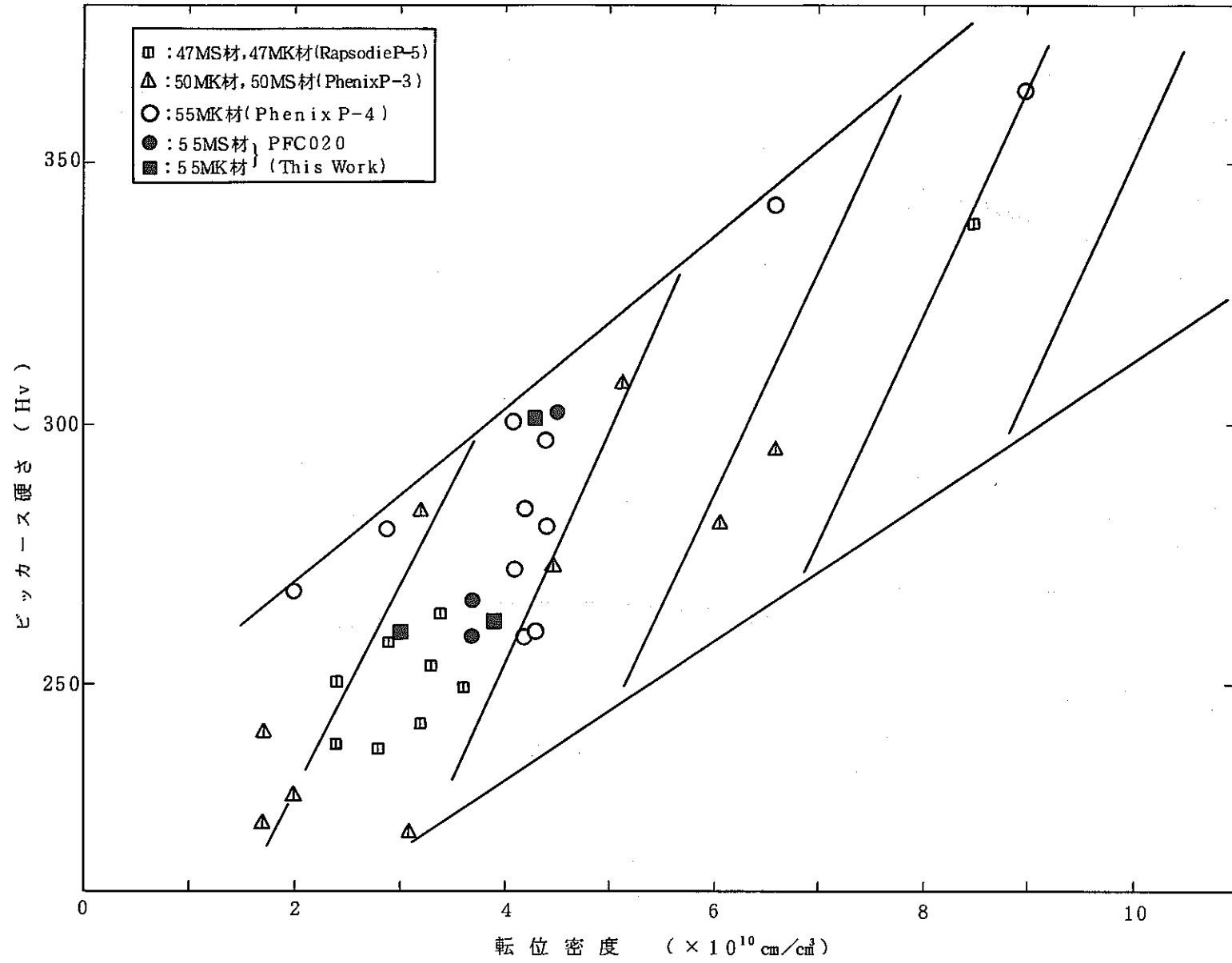


図6. ビッカース硬さと転位密度の関係

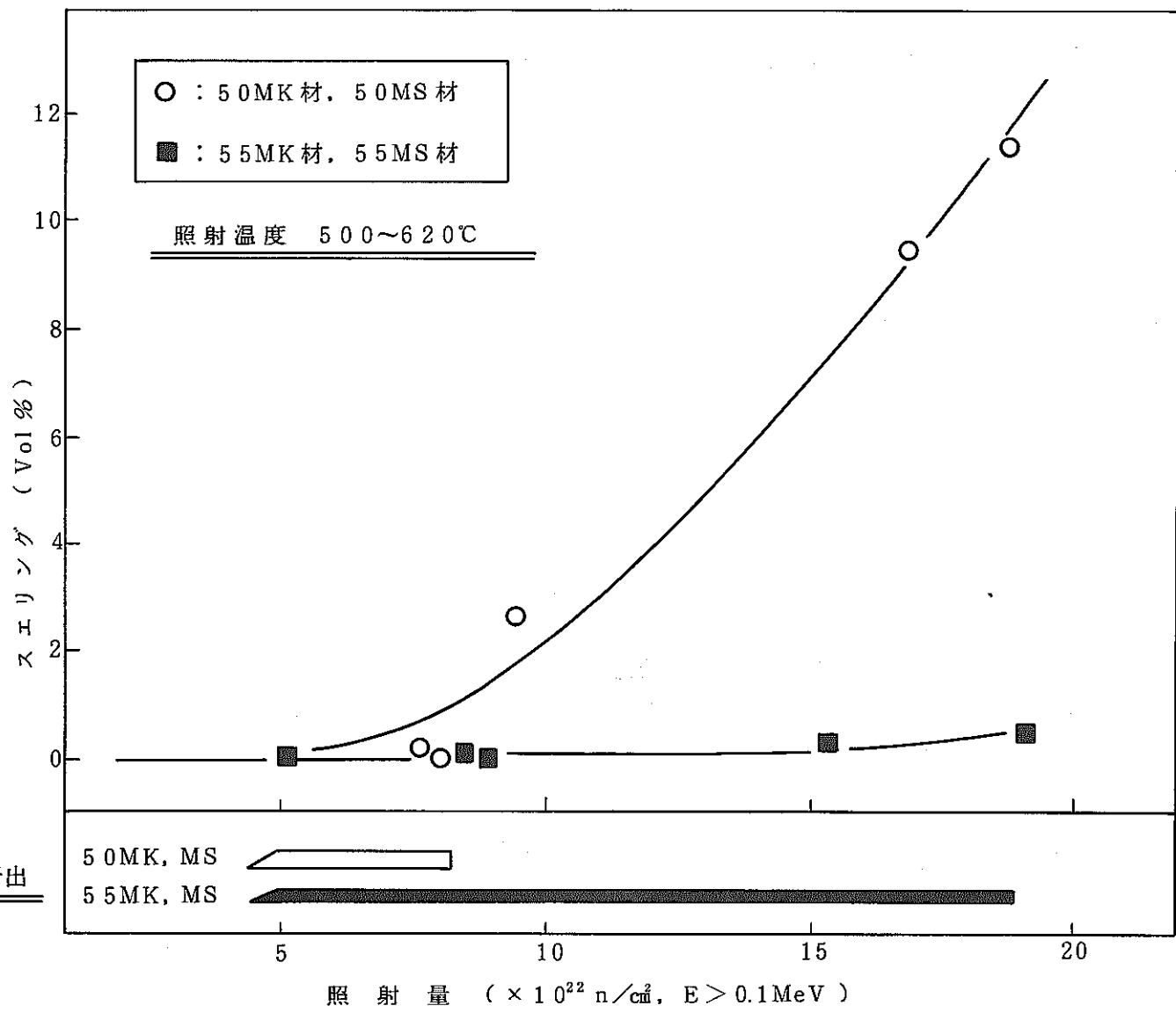
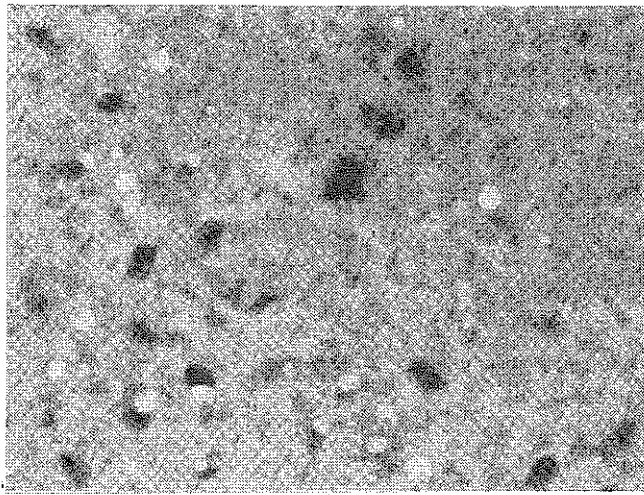
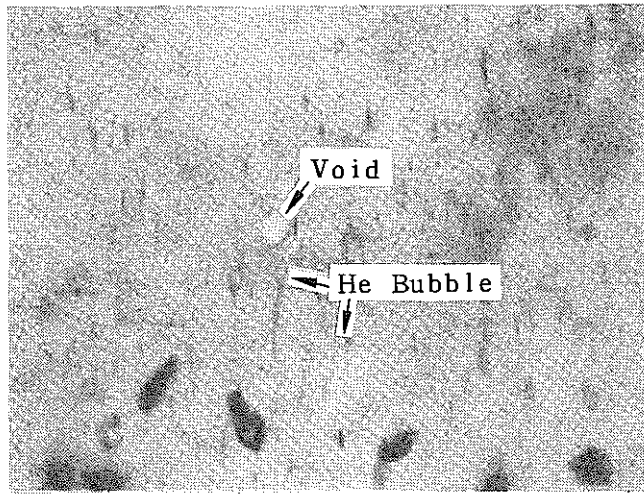


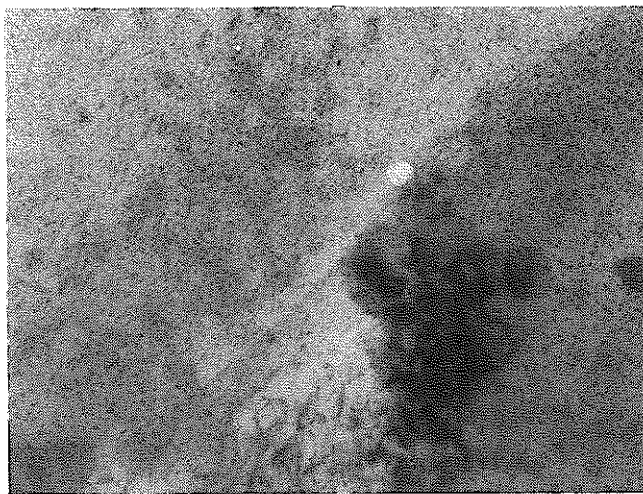
図7. 針状相の析出とスエリングの関係



(a) 55MK材; A4314 (8.6×10^{22} n/cm², 528°C)



(b) 55MK材; A4316 (7.7×10^{22} n/cm², 580°C)

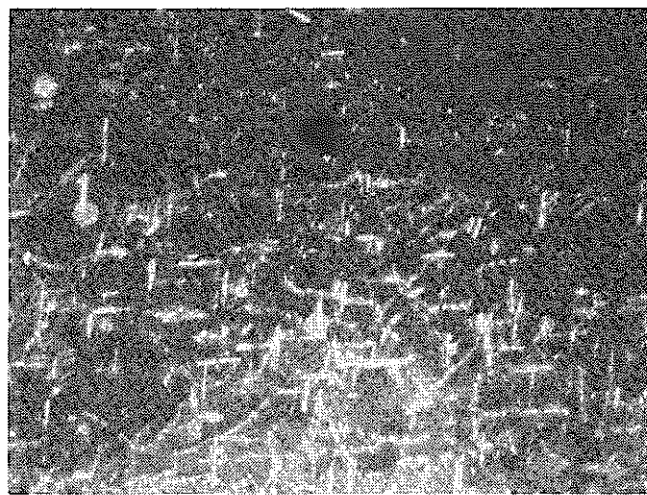


(c) 55MS材; A4304 (8.7×10^{22} n/cm², 528°C)

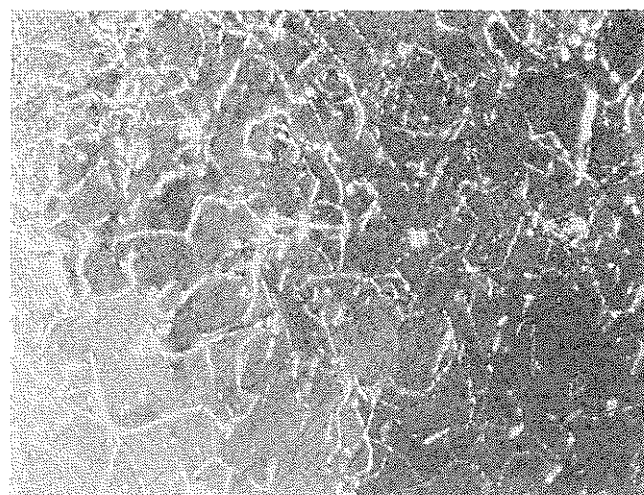
写真1. PFC020被覆管に観察されたボイド



(a) A 4 3 1 4 (8.6×10^{22} n/cm³, 528°C)

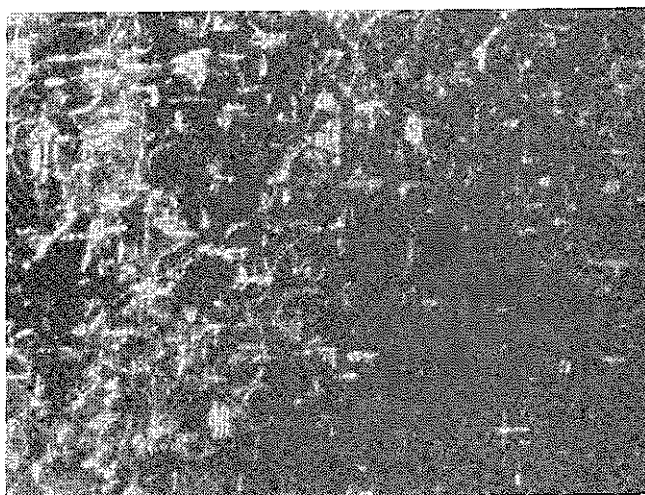


(b) A 4 3 1 6 (7.7×10^{22} n/cm³, 580°C)

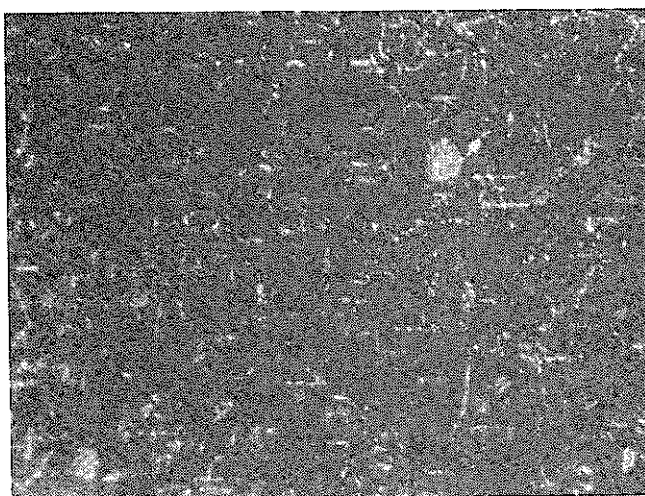


(c) A 4 3 1 8 (4.9×10^{22} n/cm³, 614°C)

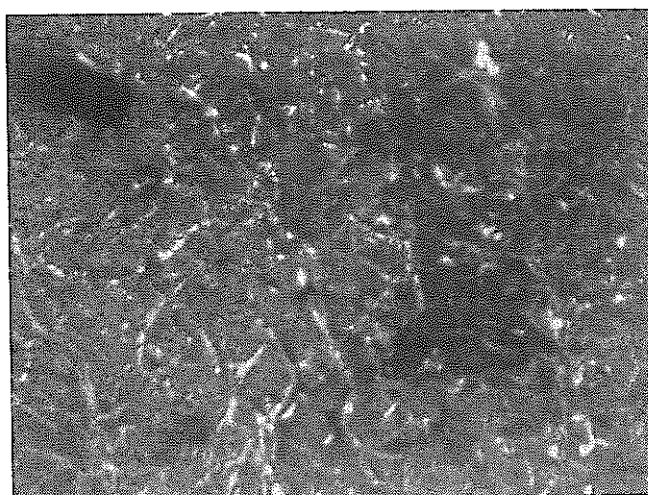
写真2. PFC020被覆管(55MK材)の転位分布



(a) A4304 (8.7×10^{22} n/cm², 528°C)

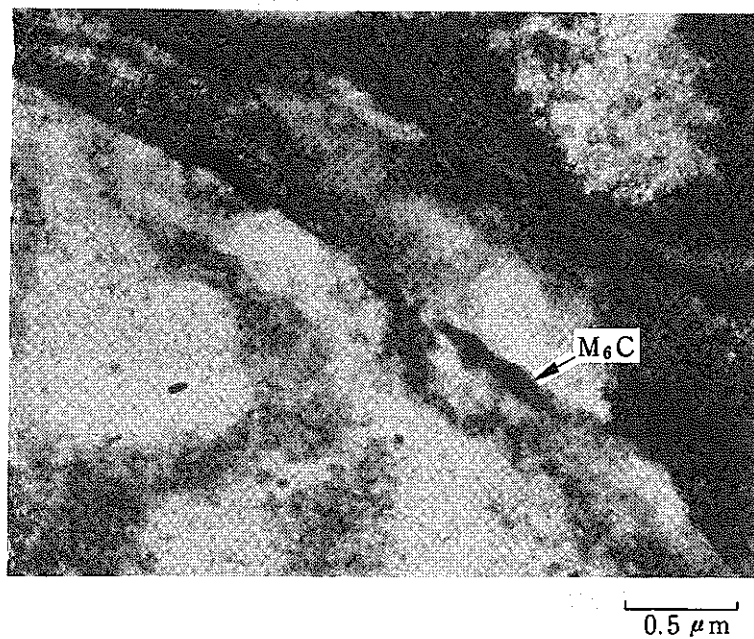


(b) A4306 (7.7×10^{22} n/cm², 580°C)

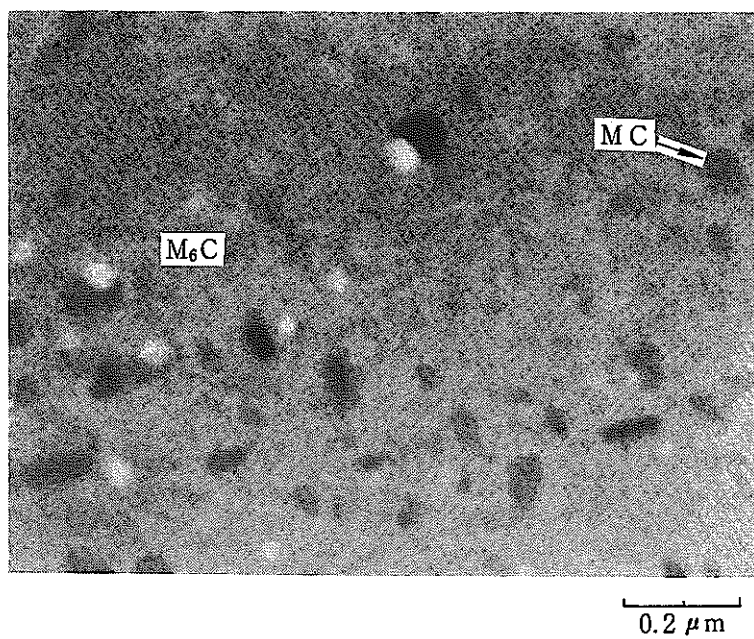


(c) A4308 (5.3×10^{22} n/cm², 614°C)

写真3. PFC020被覆管(55MS材)の転位分布

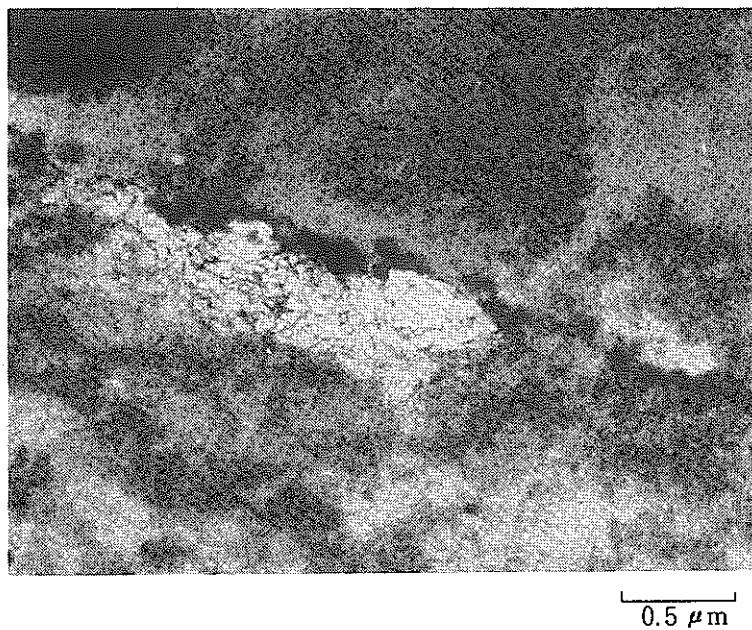


(a) 結晶粒界

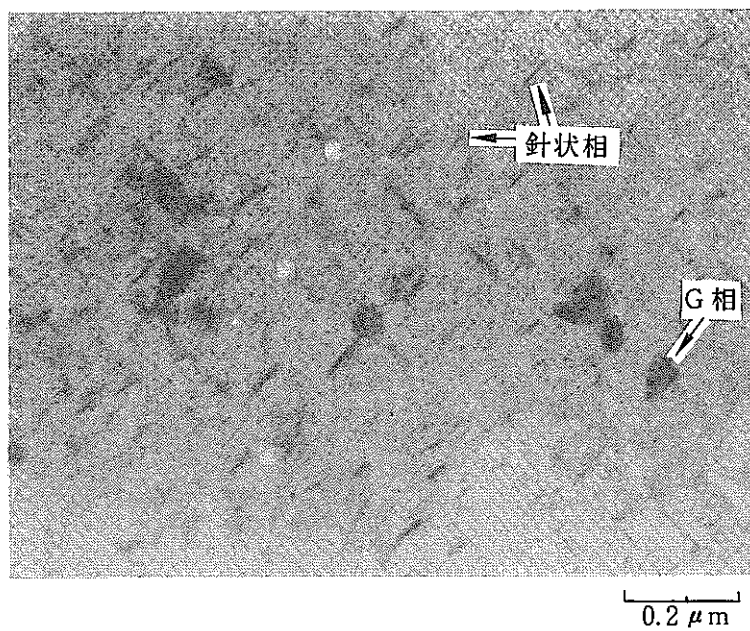


(b) 結晶粒内

写真4. A4314 (8.6×10^{22} n/cm², 528℃; 55MK材)に観察された析出相



(a) 結晶粒界

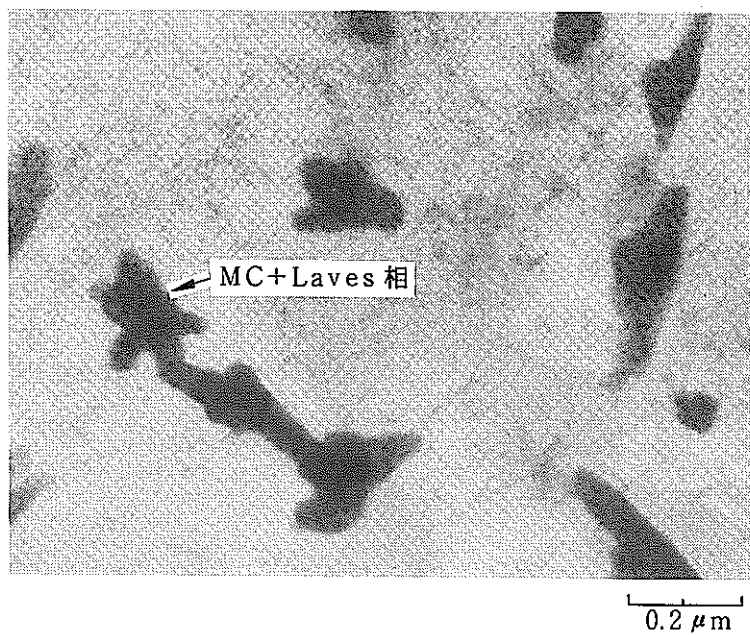


(b) 結晶粒内

写真5. A4316 ($7.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^3$, 580°C; 55MK材)に観察された析出相



(a) 結晶粒界



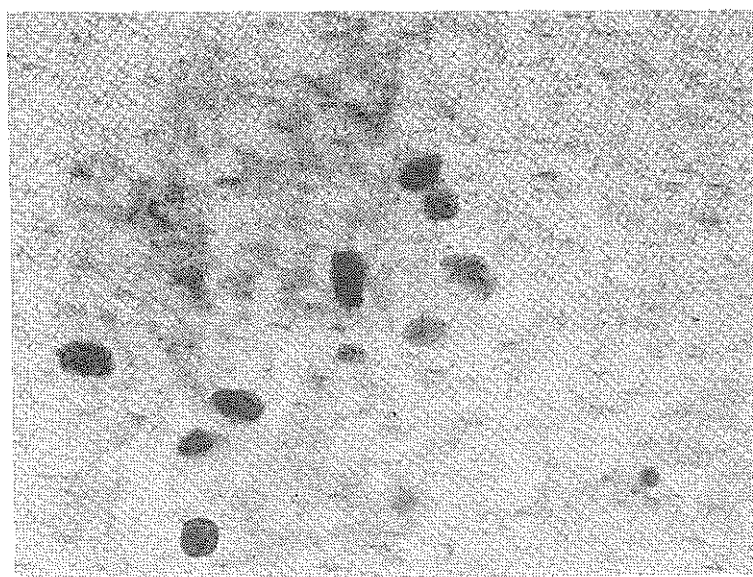
(b) 結晶粒内

写真6. A4318 ($4.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, 614°C; 55MK材)に観察された析出相



0.5 μm

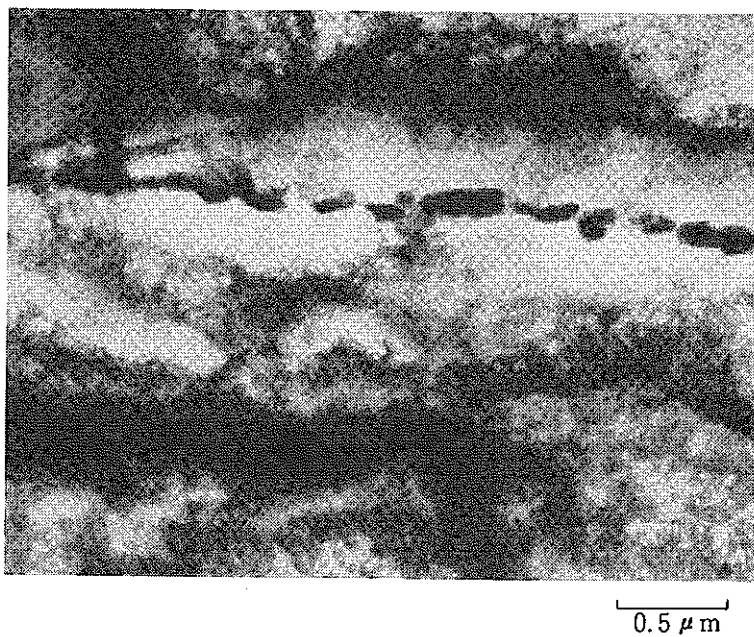
(a) 結晶粒界



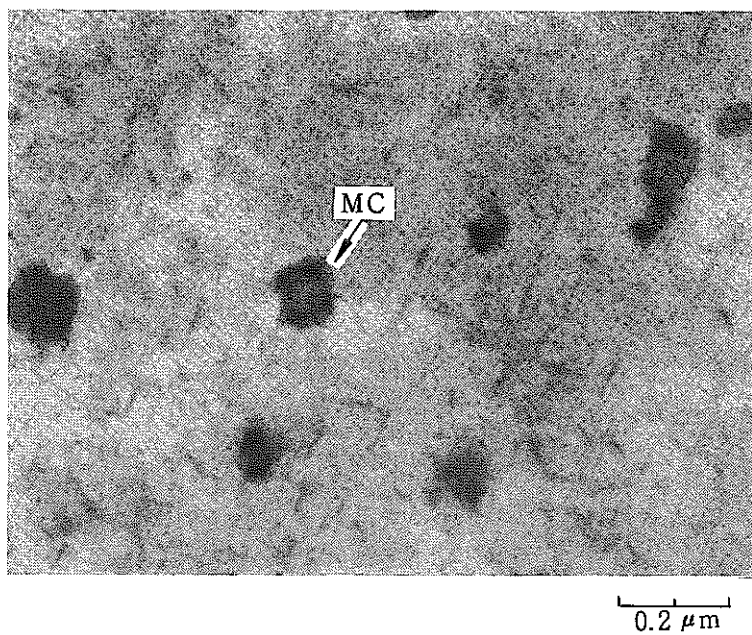
0.2 μm

(b) 結晶粒内

写真7. A4304 (8.7×10^{22} n/cm², 528℃; 55MS材)に観察された析出相

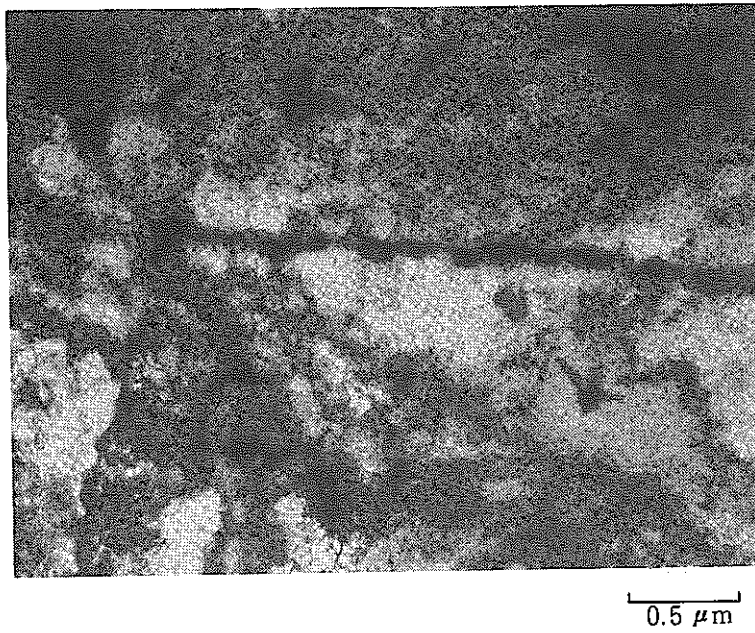


(a) 結晶粒界

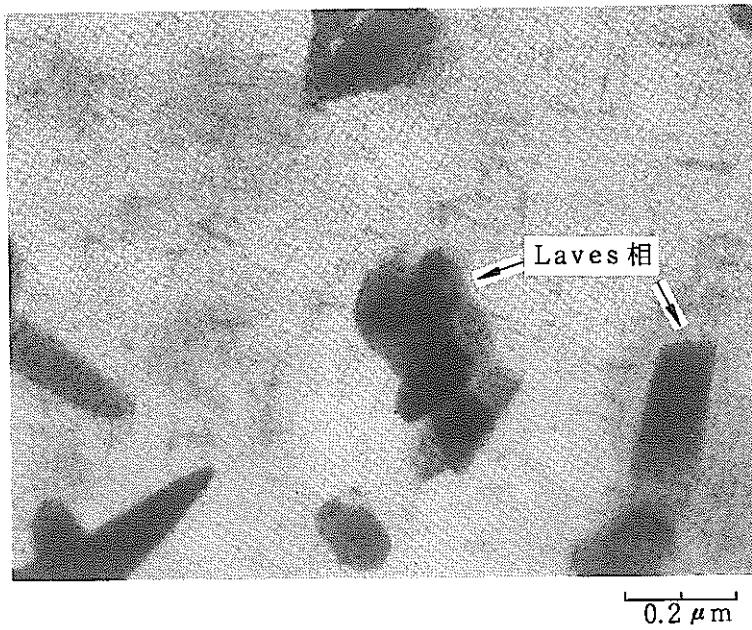


(b) 結晶粒内

写真8. A4306 ($7.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, 580°C; 55MS材)に観察された析出相

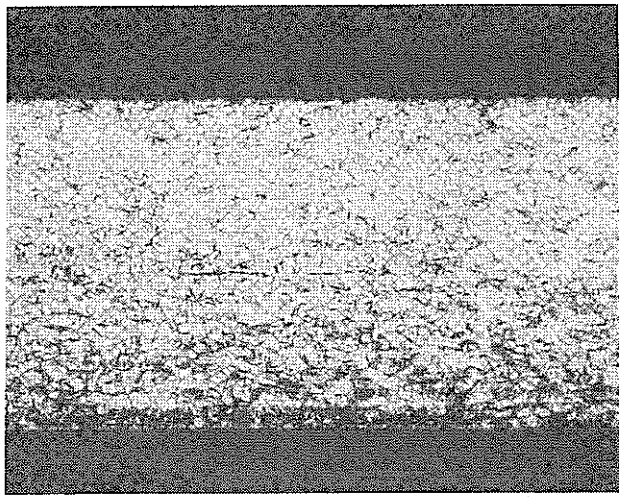


(a) 結晶粒界



(b) 結晶粒内

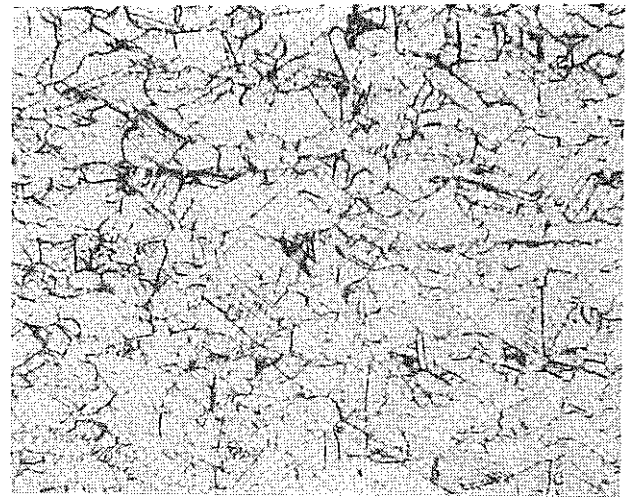
写真9. A4308 ($5.3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, 614°C; 55MS材)に観察された析出相



外面
↑

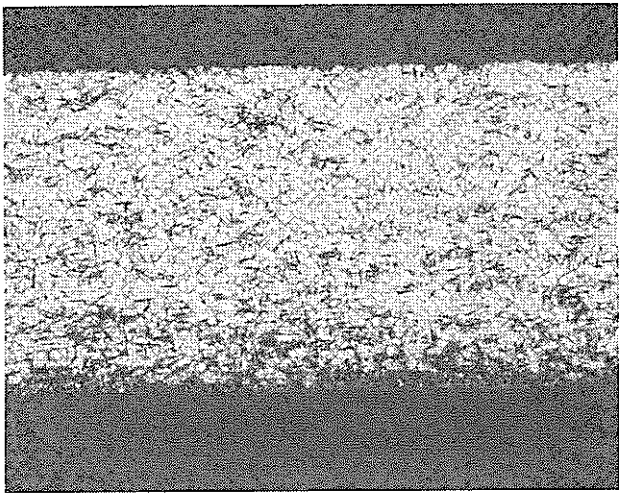
↓
内面

100 μm



50 μm

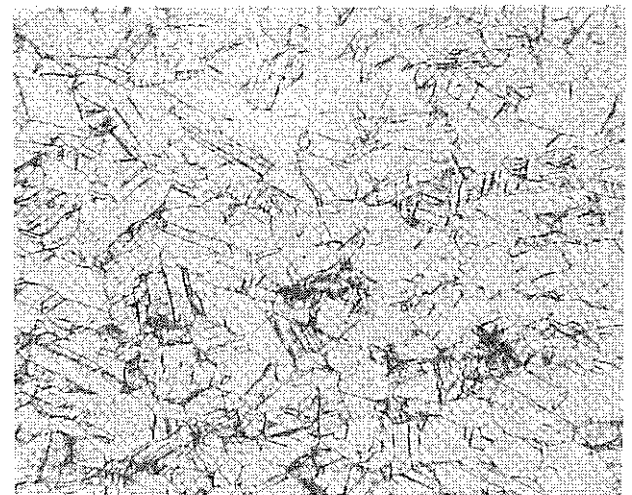
(a) A 4 3 1 4 (8.6×10^{22} n/cm², E > 0.1 MeV ; 5 2 8 °C)



外面
↑

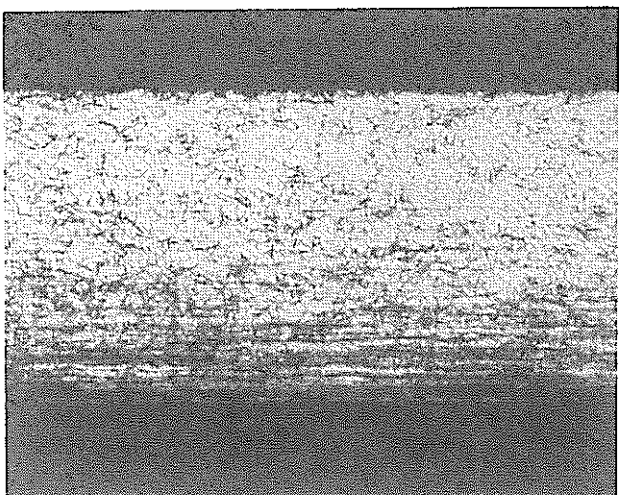
↓
内面

100 μm



50 μm

(b) A 4 3 1 6 (7.7×10^{22} n/cm², E > 0.1 MeV ; 5 8 0 °C)



外面
↑

↓
内面

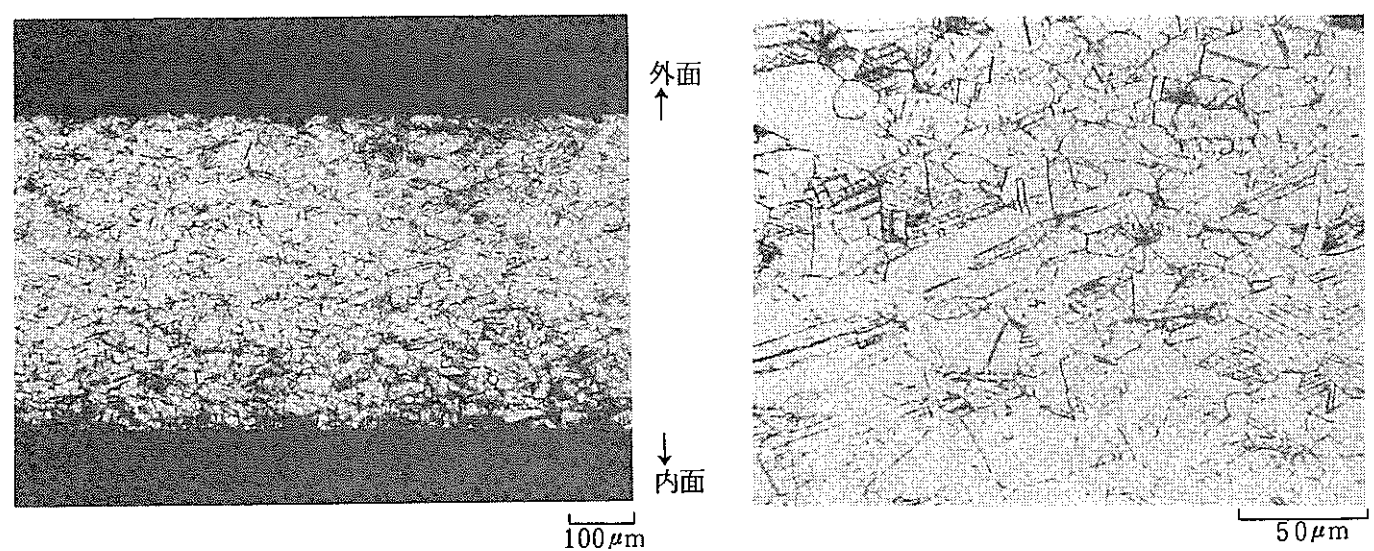
100 μm



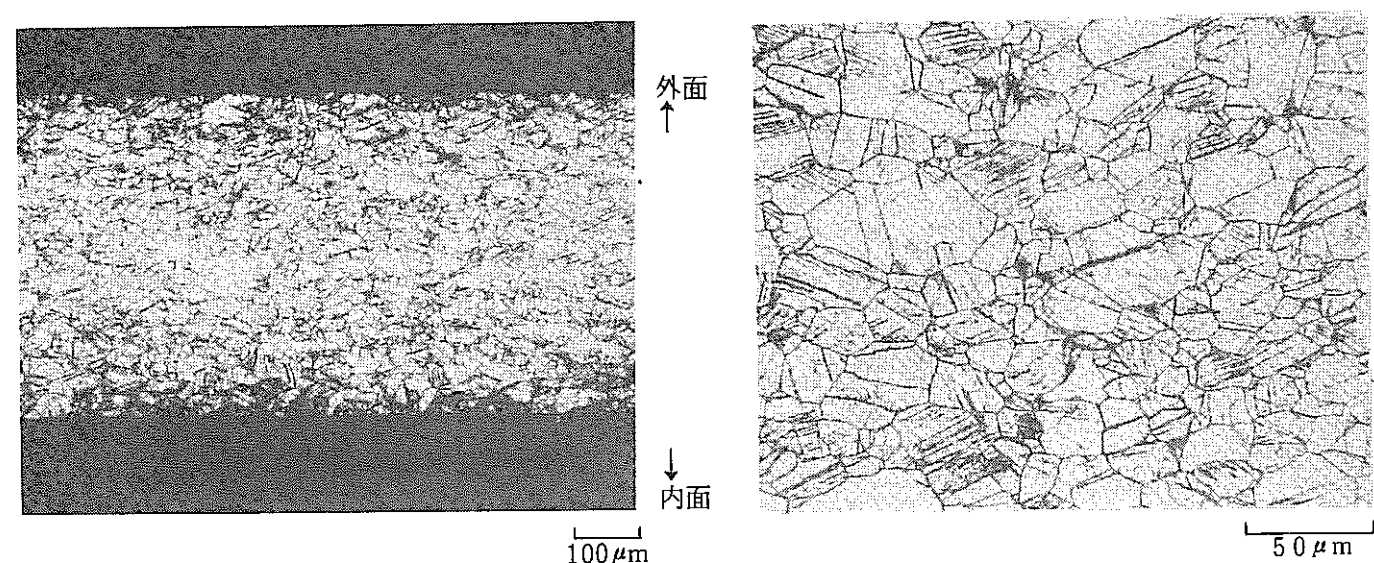
50 μm

(c) A 4 3 1 8 (4.9×10^{22} n/cm², E > 0.1 MeV ; 6 1 4 °C)

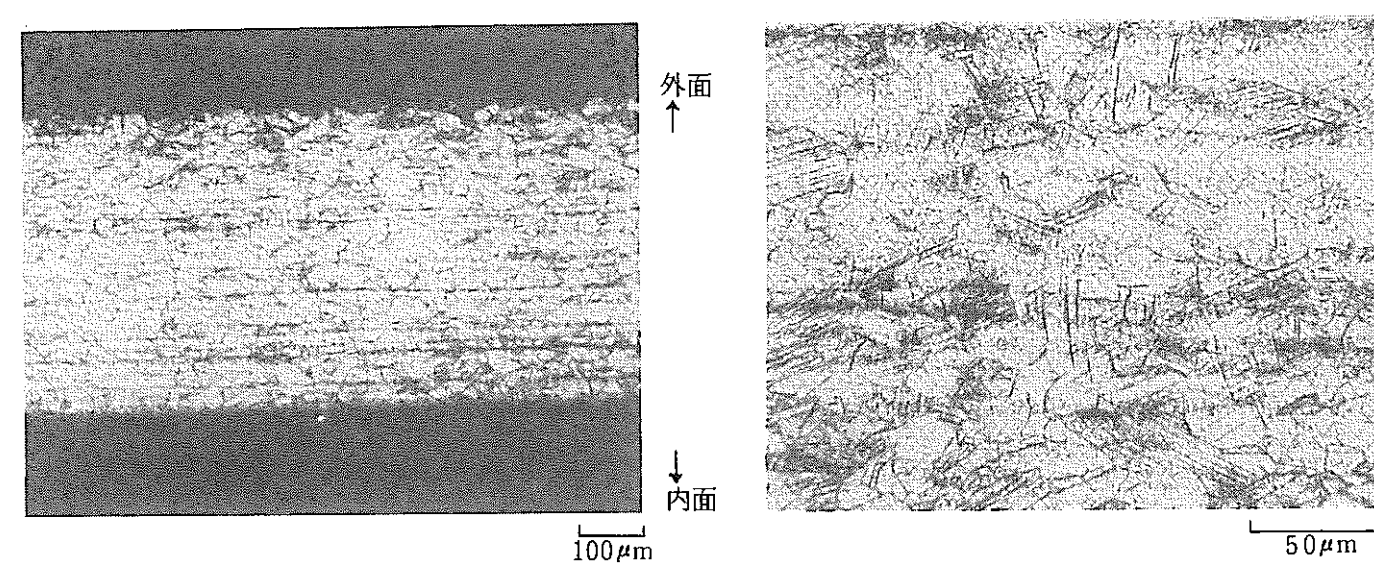
写真 1 0. PFC020 被覆管 (5 5 MK 材) の金相写真



(a) A 4 3 0 4 ($8.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{ MeV}$; 528°C)



(b) A 4 3 0 6 ($7.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{ MeV}$; 580°C)



(c) A 4 3 0 8 ($5.3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{ MeV}$; 614°C)

写真 1 1. PFC020 被覆管 (55MS 材) の金相写真