

ODS フェライト鋼被覆管のイオン照射による スエリング特性に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 九州大学 共同研究報告書)

(研究報告)



2000年3月

核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター
九州大学 応用力学研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

ODS フェライト鋼被覆管のイオン照射によるスエリング特性に関する研究
(研究報告)

吉田直亮*、渡辺英雄*

要 旨

本報告書は標記課題につき、核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)及び九州大学応用力学研究所(以下、九大)が平成11年度に共同して研究を行った成果のうち、九州大学実施分をまとめたものである。

ODSフェライトステンレス鋼のボイドスエリングのピーク温度である450°Cで最大100 dpa までのイオン照射実験を九州大学応用力学研究所設置のタンデム加速器を用いて実施した。その結果、アルゴンガス雰囲気中でメカニカルアロイング(MA)したフェライト系 ODS 鋼熱処理仕上げ材(F93)においてのみ、直径10nm以下の微小なボイドが観察されたが、この試料の冷間加工材及び他の試料ではボイドが観察されず、本 ODS フェライトステンレス鋼被覆管の耐照射性が確認された。

*:九州大学応用力学研究所

本報告書は、九州大学が核燃料サイクル開発機構との共同研究により実施した研究の成果である。

サイクル機構担当室:大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部
照射材料試験室

The study of void swelling behavior of ODS ferritic fuel cladding under ion irradiation

Naoaki Yoshida* and Hideo Watanabe*

Abstract

This report describes the irradiation experiments in Kyushu University as detailed in the schedule and specification appended to the contract signed by JNC and Kyushu University.

Copper Ion irradiation experiments were performed on ODS ferritic steels at void swelling peak temperature for ion irradiation condition (450°C) up to the dose of 100 dpa. Five kind of ODS ferritic TEM samples, manufactured from fuel cladding pipe, were used for the irradiations. Small voids of about 10 nm were only detected in solution treated F93 samples (F93SA), that were mechanically alloyed in argon gas atmosphere, but not in cold worked F93 samples (F93CW) and also other samples observed in this study. The study showed the strong void swelling resistance of these materials at higher dose levels.

* Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

JNC : Materials Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Irradiation Center, Oarai Engineering Center.

目次

1章 前書き	1
1.1 研究内容と報告書の構成	1
1.2 緒言	1
2章 イオン照射による重照射実験及びその評価法	3
2.1 ODS フェライト系ステンレス試料の照射実験	3
2.2 PNC316鋼の温度変動照射実験	4
3章 イオン照射実験結果	5
3.1 ODS フェライト系ステンレス鋼	5
3.2 PNC316ステンレス鋼	6
4章 考察	10
4.1 ODSフェライト系ステンレス鋼の照射効果	10
4.2 PNC316鋼の温度変動照射効果	10
5章 総括	12
参考文献	13
図表	14

1章 前書き

1.1 研究内容と報告書の構成

報告書は5章よりなり、第1章前書きは、研究の目的とその背景及び研究内容を述べたものである。第2章は、照射試料及びイオン照射実験の詳細を述べ、第3章では、供試材である ODS(酸化物分散強化)フェライト鋼での重照射実験及び PNC316鋼の照射温度変動実験を行い、内部組織の観察を行うことにより、ODS フェライト系ステンレス鋼に関しては酸化物分散粒子とスエリング抑制効果との関係、オーステナイトステンレス鋼の照射温度変動効果に関しては、リン化合物の照射下での安定性とボイドスエリングとの相関に関する知見を得た。第4章では、本イオン照射から得られた知見を考察し、第5章総括では本結果のまとめをおこなうと共に、これらの知見から今後の研究の進め方について提言する。

1.2 緒言

本研究に先立ちこれまで実施してきた ODS フェライト鋼の電子線照射実験では、ODS フェライト鋼のボイドスエリング特性は冷間加工度及び再結晶組織の有無や MA (メカニカル・アロイニング) 中での雰囲気ガスの影響を大きく受けることが明らかになった⁽¹⁻³⁾。従って、本共同研究では、高速炉における耐照射特性に優れた炉内新構造材料の開発を目的として、電子線に比べより現実的な手法であるイオン照射によるシミュレーション照射試験を実施した。即ち、ODS 分散強化フェライト系ステンレス鋼に対して、照射量としては最大 100dpa 程度まで行い、高照射量まで耐えうる高速炉炉内材料の開発、損傷機構解明を目的とし、本 ODS フェライト鋼被覆管の高照射領域での照射特性を評価する。

一方、PNC316鋼及びそのモデル合金の照射特性評価に関しては、これまで過去三カ年間⁽⁴⁻⁶⁾に亘り、1)平成7年度;オーステナイト鋼における析出物の照射安定性評価(I) 2)平成8年度;オーステナイト鋼における析出物の照射安定性評価(II) 3)オーステナイト鋼における析出物の照射安定性評価(III)が実施された。これより、イオン照射による照射特性の評価が実施され、高照射領域のスエリング特性の改良にはリン化合物析出物の照射安定性の評価が不可欠であることが示された。しかし、これまで実施されたイオン照射実験は照射温度が一定の条件で実施されていたが、近年、

高速炉^(7, 8)の立ち上げ及び立ち下げ中での低温で少量の中性子照射がその後の高照射領域での内部組織に大きく影響を与えることが 316 系オーステナイトステンレス鋼やそのモデル合金等で明らかにされ^(7, 8)、これまでの原子炉を用いた高照射領域での実験結果を見直す必要が急務となった。従って、本年度は PNC316鋼の温度変動効果に関する実験を新たに実施し、高速炉の起動・停止に伴う低温での照射が高照射領域でのスエリング挙動に如何に影響を及ぼすかに関し、温度変動照射下での PNC316鋼の照射特性を評価した。

2章 イオン照射による重照射実験及びその評価法

2.1 ODS フェライト系ステンレス試料の照射実験

本実験で用いた ODS フェライト系ステンレス鋼は、以下の5種類で核燃料サイクル開発機構より提供をうけている。

フェライト系 ODS 鋼再結晶材

(1) F93 冷間加工材 (アルゴンガス中 MA) (以下、F93CW)

(2) F93 熱処理材 (アルゴンガス中 MA) (以下、F93)

(3) F94 熱処理材 (ヘリウムガス中 MA) (以下、F94)

マルテンサイト系 ODS 鋼

(4) M92 (アルゴンガス中 MA) (以下、M92)

レファレンス材

(5) PNC-FMS (以下、62FK)

以上の、被覆管供試材の成分分析結果を表1に示す。電子顕微鏡用の直径3ミリのTEM試料は、上記被覆管材から直接作成されており、試料の熱処理等は被覆管材と同一である。

イオン照射実験には、九州大学応用力学研究所設置の1MVイオン加速器を用いた。イオンの核種としては、 Cu^{2+} を用いた。2 価の銅イオン(2.4MeV)を試料に注入した際の損傷分布を図1に示す。図中で、赤線及び青線で示しているものが損傷及び打ち込んだ銅イオンの分布をそれぞれ示している。本研究では、既に報告済み⁽⁴⁻⁶⁾の方法により損傷ピーク(約400nm)手前の約300nm 近傍を背面研磨により作成した試料を準備した。試料の電解及び化学研磨の条件等を図2及び図3に示す。照射温度は、平成9年度の共同研究⁽⁶⁾にて確認済みである本ODSフェライト鋼のイオン照射でのピークスエリング温度の450℃で実施し、照射量は最大100dpa である。イオン種として銅を用いた場合、高照射領域では、注入した銅が試料中に蓄積・析出することが予測されるが、本研究に先立ち100dpa 程度の照射量では、注入された銅イオンの影響を無視できることを確認している。

イオン照射後、内部組織を200KV分析電子顕微鏡写真より観察し、欠陥の密度お

よびサイズを測定した。欠陥密度は、単位面積当たりの欠陥の個数を 2-beam 条件における等厚干渉縞より求めた試料厚で割ることにより、単位体積当たりの数密度を求めた。

2. 2 PNC316 鋼の温度変動照射実験

PNC316 鋼及びこの試料の比較材として、九州大学応用力学研究所にて試作された、以下の 2 種の合金を用いた。

(1) Fe-16Cr-17Ni-0.1P (P 単独添加材)

(2) Fe-16Cr-17Ni-0.25Ti-0.1P (P, Ti 複合添加材)

温度変動イオン照射実験は、主に高速炉起動時の照射環境を模擬する目的で、先ず低温(200 から500°C程度)領域で1dpa 程度の予照射を実施して、その後ボイドや析出物の形成が顕著となる高温(650°C程度)の領域で高照射領域まで照射した。実験では、この内部組織(特にスエリング挙動)を一定温度で照射された組織と比較することにより、PNC316鋼の温度変動下での健全性を評価する。この際、先ず低温での予照射の影響を受けやすい P 単特添加材で、本温度変動効果が最大となる温度条件を決定し、その後 PNC316鋼を用い同一条件で高照射量まで照射した。

2. 4 MeV の銅イオン照射後、試料は2. 1と同一の方法にて、損傷領域近傍を背面研磨され、電子顕微鏡を用いた観察が実施された。

3 章 イオン照射実験結果

3. 1 ODS フェライト系ステンレス鋼

図4及び図5に照射前の、M92、62FK、F93CW 及び F94、F93 の内部組織を示す。図4に示す様に、M92、62FK はマルテンサイト組織により、F93CW は冷間加工により形成された高密度の転位組織が観察されている。また、分散強化された微小 Y_2O_3 粒子は通常の電顕観察では確認されず、本合金では、これらの微小粒子が試料全体に均一に分散されていることを示唆している。一方、F94、F93 では転位組織は殆ど観察されないが、ごくまれに図の矢印で示す様に、析出物のコントラストを有する直径100nm程度の球状介在物が観察された。これを EDS を用いて成分分析した結果を図6に示す。図6中の(a)には、マトリクスからのスペクトラム、(b)には、前述した球状介在物からのスペクトラムを示す。これから明らかな様に、この介在物はアルミニウム、チタンが濃化した酸化物である。これらは、合金作成中(MA 処理中)に誤って試料に混入したものと予測されるが、直径が100nm 程度と大きく且つ密度($\sim 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)も低いことから、本照射実験への影響は極微であると予測される。以下に、450°Cで照射後の内部組織について述べる。

1) 50dpa 照射

この照射量では、観察した5種類いずれの試料においても、照射による内部組織の変化は観察されない。図7に、F94 及び F93 の50dpa 照射後の内部組織を示す。写真はボイドコントラストで撮影した組織であるが、ボイド等の発生はない。

2) 70dpa 照射

図8、9に M92、62FK、F93CW 及び F94、F93 の 70dpa 照射後の内部組織を示す。図8に示す様に、照射前から存在する加工転位密度の高い M92、62FK、F93CW では、この照射量においても照射による組織変化は観察されない。しかしながら、図 9 に示す様に、ヘリウムガス MA・熱処理仕上げ材 F94 では、ボイドコントラストによる観察においてもボイドは観察されないが、アルゴンガス MA・熱処理仕上げ材 F93 では直径10 nm 以下のボイドが多数観察された。しかしながら、本試料においても、スエリングへの寄与は0.1%以下であり極微である。

3) 100dpa 照射

70dpa照射後の組織と同一であり、アルゴンガスMA・熱処理仕上げ材 F93 を除きボイドは観察されていない。この様に、本ODSフェライト鋼被覆管材は、本材料のピークスエリング温度である 450℃での照射下でもスエリングの形成が極めて抑制されている。

3. 2 PNC316ステンレス鋼

PNC316 鋼の比較材として、温度変動照射された(1)P 単独添加材、(2)P, Ti 複合添加材の結果を示し、次に(3)PNC316 鋼の結果について述べる。

(1) P 単独添加材 (Fe-16Cr-17Ni-0.1P)

図 10 に低照射領域 (~10dpa) での 200 から 500℃で予照射を行いその後、650℃で照射した実験結果を示す。200℃予照射では、微細で高密度の格子間原子型転位ループの形成が観られた。しかし、この転位ループは 650℃への昇温時にほぼ消滅し、その後の高温追照射での損傷組織は、650℃一定温度照射時のそれとほぼ同じであった。すなわち、高温追照射時のリン化合物の析出挙動および形成された転位ループの挙動が、一定温度照射時と大きな違いがない。また、リン化合物密度およびサイズ変化の照射量依存性を一定温度照射と比較しても、高温追照射で形成されたリン化合物の密度およびサイズは、高温一定温度照射でのものとほぼ同じであり、その変化も高温一定温度照射と同じ傾向を示している。

しかしながら、400℃/650℃、500℃/650℃温度変動照射では、追照射後の組織が一定温度と比較して大きく異なり、高温追照射時の欠陥挙動は低温予照射の影響を強く受けたものとなった。650℃において 1dpa の追照射が加わると、一定方向に伸びたほぼリン化合物と分かるコントラストを持ったものが高密度に形成されているのが分かる。さらに、650℃での照射量が 5dpa、9dpa と増加すると、それは<100>方向に成長する典型的なリン化合物の成長形態を示した。この 400℃/650℃温度変動照射における高温追照射で形成されたリン化合物は、高温

一定温度照射時のものと比べると非常に微細でかつ高密度なものであり、その析出挙動は低温予照射の影響を大きく受けたことが分かる。650℃での追照射で形成されたリン化物の密度は、650℃での一定温度照射において形成されたリン化物密度より約2桁も大きい。

図11に、高照射領域（～75dpa）での結果を示す。既に述べた様に、200℃/650℃温度変動照射では低温予照射の影響は高温追照射での欠陥挙動にあまり影響を及ぼさない。よって高照射領域における内部組織変化も高温一定温度照射とほぼ同様で、75dpaの高照射領域までリン化物は安定に存在し、その結果ボイドの形成も強く抑制されていた。リン化物密度およびサイズ変化は一定温度照射と同様の傾向を示しており、高温追照射での高照射領域においても低温予照射の影響はほとんどない。以上の結果は、低温から高温への温度変動照射では、一旦昇温時において欠陥組織が回復する様な場合は、高温追照射において低温予照射がまったく影響を及ぼさないことを示唆している。

400℃/650℃温度変動照射では、高温追照射での欠陥挙動に低温予照射が大きな影響を及ぼし、その結果高温追照射初期のリン化物の挙動が高温一定温度照射時と大きく異なり、非常に微細でかつ高密度のものであった。この様なリン化物は高温での追照射量が増加すると、その密度は大きく減少し、その照射下相安定性は小さい。高温での9dpaの照射量で形成されていた微細かつ高密度のリン化物は、25dpaの照射量では成長はみられたものの密度が大きく減少しており、それに伴い大きく成長した転位ループの形成が観察された。25dpaの照射量ではボイドの形成はみられなかったが、50dpaの照射量ではリン化物の密度がさらに低下し、ボイドの形成が観察された。そして75dpaの照射量ではリン化物は観察されず、ボイドの密度およびサイズが増加しスエリングが非常に大きくなっていった。リン化物密度は高温追照射における照射量増加とともに大きく減少し、50dpaの時点で一定温度照射に比べて既に小さくなっており、その結果400℃/650℃温度変動照射では一定温度照射に比べてボイドの核形成が促進されたと考えられる。この結果は、低温予照射が高温追照射での欠陥挙動に大きく影響を及ぼす様な温度変動照射ではリン化物の照射下相安定性が小さくなり、ボイド核形成の潜伏期間が一定温度照射に比べて大きく短縮される可能性があることを示唆している。また、低温予照射は僅か1dpaにもかかわらず、その高

温追照射での影響は 75dpa の高照射領域まで及んでいることより、僅かな低温予照射でも、その影響は高照射領域まで及ぶことが明らかとなった。

500℃/650℃温度変動照射では 400℃/650℃温度変動照射と同様に、低温予照射の影響が高温追照射での欠陥挙動に大きく影響を及ぼし、高温追照射初期に形成されたリン化物は高密度であった。しかし、リン化物密度の減少は 400℃/650℃温度変動照射時に比べると小さく、75dpa の照射量でもリン化物は観察され、その結果ボイドの形成は抑制されていた。これらの現象をまとめると図 15 の様になる。

(2) Ti・P 複合添加材 (Fe-16Cr-17Ni-0.25Ti-0.1P)

本実験では、P 単独添加材と同様に予照射として 400℃で 1dpa の照射を行った後に 650℃でそれぞれ 1, 9, 75dpa の追照射を行い、リン化物の挙動およびボイドスエリング抑制効果に与える低温予照射の影響を P 単独添加材と比較検討した。図 1 2 は、Ti・P 複合添加材において 400℃/650℃温度変動照射を行った際の内部組織変化である。また、測定されたスエリング及びリン化物の数密度を図 1 3 に示す。低温予照射の段階では P 単独添加材と同様に、微細な転位ループとともに微細なリン化物の形成が確認された。低温予照射後に高温へ昇温するとこの様な欠陥クラスターはある程度回復するが、P 単独添加材と同様に安定な欠陥クラスターが残存する。しかし Ti・P 複合添加材では P 単独添加材と異なり、高温への昇温時にリン化物の成長が観察され、さらに転位ループも残存していた。これは、オーバーサイズ原子である Ti と空孔との相互作用が強いために、昇温にともなう微小空孔集合体の分解により導入される単空孔の移動が制約されることにより、格子間原子集合体の消滅、収縮が遅れたことが原因と考えられる。高温での追照射では、この様に残存したリン化物が核となり、一定温度照射に比べて高密度で微細なリン化物が形成された。これは P 単独添加材でみられた現象と同様である。しかし、高温への昇温時に残存していた転位ループは、その後の 1dpa の追照射でほぼ完全に消滅し、9dpa の追照射量では新たな転位ループの形成はみられなかった。

一方、高温追照射における高照射領域でのリン化物の挙動は、P 単独添加材のそれとは大きく異なった。P 単独添加材では、高照射領域におけるリン化物の相

安定性が著しく損なわれることにより、75dpa の追照射量でポイドスエリングが非常に大きくなることが明らかとなった。Ti・P 複合添加材における同条件での温度変動照射では、高照射領域でのリン化物の相安定性が非常に大きく、P 単独添加材でみられた照射量増加にともなうリン化物密度の急激な減少はみられず、75dpa の照射量においてもリン化物は高密度かつ微細なものであった。さらに、75dpa の照射量においても転位ループの形成もしくは転位線の発達はほとんどみられず、ポイドの形成も強く抑制されていた。

以上の結果より、Ti・P 複合添加材では P 単独添加材と同様に、400℃/650℃ 温度変動照射において低温予照射の影響は高温追照射におけるリン化物の微細化、高密度化という形で顕著に現れるが、リン化物の照射下相安定性が非常に大きいことにより、P 単独添加材とは逆に高照射領域においてもリン化物は微細かつ高密度な状態が持続されることが明らかとなった。この効果によりポイドスエリングは強く抑制されることも明らかとなった。

(3) PNC316 鋼

図 1 4 は、PNC 3 1 6 鋼を 400℃/650℃ 温度変動照射を行った際の内部組織変化を示す。この材料においても前述した Ti, P 複合添加材と同様に、添加された Ti がリン化物の変動照射環境下においても有効に作用し、75dpa の照射量においても高密度のリン化物が観察され、ポイドスエリングは顕著でない。PNC 3 1 6 鋼の場合、照射下では G 相等他の析出物の形成も顕著であるが、Ti 添加により安定化されたリン化物は、400℃/650℃ 温度変動下においても、低温予照射の影響をほとんど受けていないことが分かる。従って、本材料においても Ti 添加により形成されたリン化物はスエリングの抑制に有効に作用することが本実験より確認された。

4章 考察

4.1 ODS フェライト系ステンレス鋼の照射効果

本研究では、シミュレーション照射試験として、イオン照射による MA (メカニカル・アロイニング) 材料の重照射環境下での照射特性を評価した。この材料のスエリング挙動を理解するうえで重要となる材料特性として、1) 分散強化された Y_2O_3 酸化物が試料全体に均一に分布しているか、2) 試料に残留する雰囲気制御ガスが照射組織に影響を与えていないか、3) 冷間加工度が適切であるか等が、本被覆管材を評価する上でのポイントとなる。1) については、照射前の内部組織観察より、分散強化された粒子の均一性が確認されており、F94 や F93 等の転位密度の低い材料においてもスエリングが極端に抑制されていることより、分散強化された粒子が照射により導入された欠陥 (格子間原子や空孔) の中性シンクとして有効に働き、照射温度での点欠陥の平衡密度を下げていることは明らかである。2) については、MA 中の残留ガスが試料中に微量に存在することはある程度避けられない。これらの残留ガスは照射環境下では、微小ボイドを安定化させ、スエリングの増大につながるボイドの核形成を促進する可能性がある。しかしながら、本実験ではこの残留ガスに起因したと考えられるボイドの促進的な核形成は確認されていない。また3) についても、転位組織は照射の前後で殆ど変わらず、上述した微細に分散強化された酸化物粒子に加え、これらの加工転位が欠陥のシンクとして作用していることを示す。

この様に、イオン照射環境下においては本 ODS フェライト鋼のスエリング特性は極めて良好であるが、今後は平行して進められている常陽を用いた中性子照射試験結果と共に本材料のスエリング挙動を評価・解析する必要がある。

4.2 PNC316鋼の温度変動照射効果

高速炉の照射環境下で炉内構造材料が温度変動による組織変化を受ける可能性として、1) 炉の起動・停止時⁽⁷⁻¹⁰⁾、2) 燃料の燃焼或いはシャフリングに伴う温度変動の2つが挙げられる。前者の場合、例えば PNC316鋼ではカスケードから生き残った自由な空孔の長距離移動が可能となる温度 (300°C程度) をはさんで温度変動が繰返された場合、変動による効果が最も顕著となる。この場合、300°C以下の温度領域

で形成された転位ループ(格子間原子型及び空孔型)は、その後の高速炉の出力上昇に伴う温度上昇と運転温度での中性子照射によりその数密度が極端に減少すると予測される。またこの現象を繰返すことにより、高速炉の照射環境下においてもボイドの核形成が温度の変動効果により促進され、異常なボイドスエリングの原因となりうる。例えば、チタンを単独に添加したオーステナイトモデル合金では、200 から 400℃の温度変動を繰返すことによってボイドスエリングが異常に増大する現象が JMTR を用いた実験より報告されている⁽¹¹⁾。

一方、後者の場合は、炉内構造材中では既に空孔が十分拡散できる温度領域での変動である為、転位密度の変化は少なく、主に照射誘起により形成される析出物(例えば、リン化物)が大きな影響を受けると考えられている。

しかしながら、本 PNC316鋼での実験結果より、温度変動効果の原因1) 炉の起動・停止時に関しては、すくなくとも Ti の添加がリン化物の照射下での安定性に寄与し、低温予照射の影響を受けにくいことが確認された。

5 章 総括

核燃料サイクル開発機構提供のODSフェライトステンレス鋼及び PNC316鋼に対して、イオンによる重照射を行い、以下の事が明らかになった。

- (1) 照射前の組織観察より、顕著な偏在等はないことから、分散強化された Y_2O_3 析出物は均一に存在していると予測される。
- (2) しかしながら、熱処理された F93 及び F94 材において、MA 処理中に誤って混入したと推測される、100nm 程度のアルミニウム(チタン含有)酸化物が観察された。この混入物は、数密度が低く組織への影響は少ないものと予測された。
- (3) 450°C、70dpa 照射後の F93(アルゴンガス MA・熱処理材)でのみ、直径10nm 以下の微小ボイドが観察されたが、スエリングへの寄与は 0.1%以下であった。
- (4) PNC316鋼の温度変動照射後の内部組織変化より、温度変動照射環境下においても、本材料では添加したチタンがリン化物の安定性に効果的であり、スエリングの挙動は低温での予照射の影響を受けにくいことが明らかになった。

以上の結果より、新たに開発されたODSフェライトステンレス鋼被覆管材は、重照射環境下においてもスエリングが極微であること。また、従来から使用され、温度変動照射下でのスエリングの挙動が問題視されていた PNC316 鋼についても、高速炉の起動・停止時の低温での予照射がスエリングに及ぼす影響は極微であることが本研究より明らかにされた。

参考文献

- [1] 高橋平七郎他、ODS 鋼の電子線による照射特性評価、PNC ZY9600 96-002,1996
- [2] S. Yamashita, S. Watanabe, S. Ohnuki, H. Takahashi, N. Akasaka and S. Ukai, J. Nucl. Mater., 283-287(2000)647
- [3] S. Ukai, T. Nishida, T. Okada and T. Yoshitake J. Nucl. Sci. Technol. 35(12), (1996)936
- [4] 吉田直亮他、オーステナイト鋼における析出物の照射安定性評価(I)、PNC TY9606 98-007,1996
- [5] 吉田直亮他、オーステナイト鋼における析出物の照射安定性評価(II)、PNC TY9606 98-008,1997
- [6] 吉田直亮他、オーステナイト鋼におけるイオン照射による析出物の照射安定性評価(III)、PNC TY9606 98-009,1998
- [7] H. Watanabe, T. Muroga and N. Yoshida, J. Nucl. Mater., 217(1994)178
- [8] F.A. Garner, N. Sekimura, M. L. Grossbeck, A. M. Ermi, J. W. Newkirk, H. Watanabe and M. Kiritani, J. Nucl. Mater., 205 (1993)206
- [9] M. Kiritani, J. Nucl. Mater., 160(1988)135
- [10] M. Kiritani 他、J. Nucl. Mater., 174 (1990)327
- [11] N. Yoshida 他、J. Nucl. Mater., 212-215(1994)471

表1 供試材の成分分析結果

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃	Ex. O	N	Ar	Mo	Co	V	Nb	備考
F93	0.065	0.03	0.046	0.004	0.004	0.028	11.82	1.93	0.22	0.22	0.09	0.012	0.0046	/	/	/	/	Ar-メカニカル・アロイング材 F93, F93CW
F94	0.058	0.03	0.049	0.004	0.004	0.025	11.78	1.93	0.30	0.24	0.04	0.010	0.0003	/	/	/	/	He-メカニカル・アロイング材 F94
M92	0.13	0.02	0.036	0.003	0.004	0.022	9.00	1.94	0.20	0.30	0.04	0.010	0.0034	/	/	/	/	Ar-メカニカル・アロイング材 M92
62FK	0.18	<0.01	0.51	0.005	0.002	0.45	11.40	2.77	/	/	/	0.016	/	0.12	<0.01	0.16	0.06	溶解鑄造材 Pin No. FK007

Y₂O₃=Y分析値×1.27、 Ex. O=O分析値-(Y分析値×0.27)

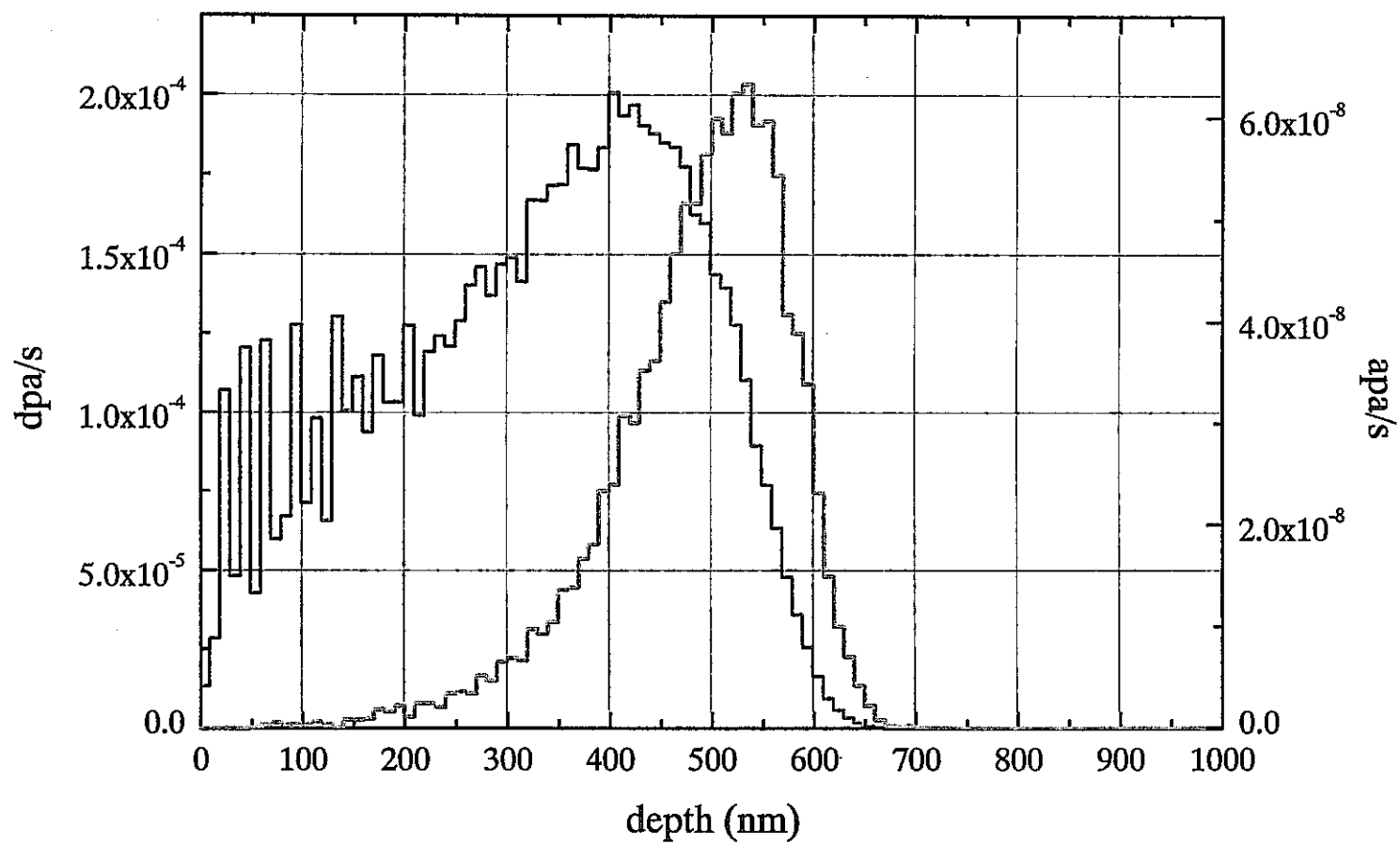


図 1 損傷分布の深さ依存性 (トリムコードによる計算例)

	電圧	温度
電解研磨条件	25V	-25℃
Jet 研磨条件	60V	室温

図 2 供試材の研磨条件

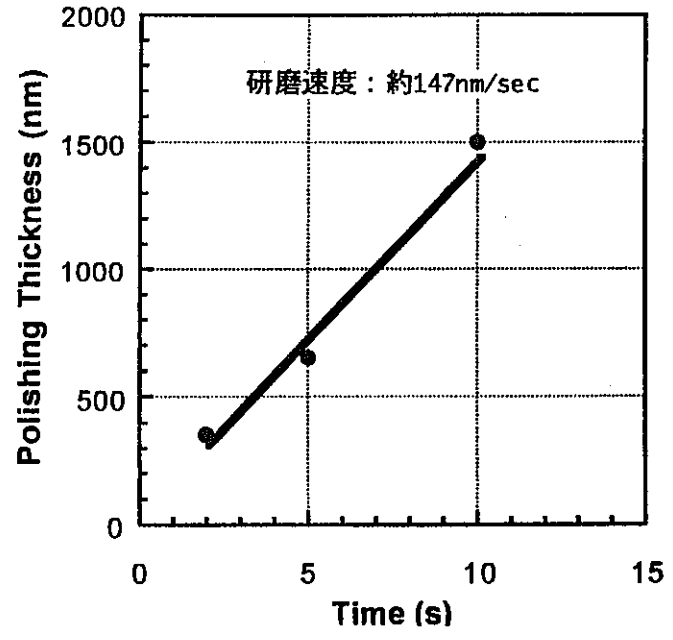


図 3 単位時間当たりの研磨量

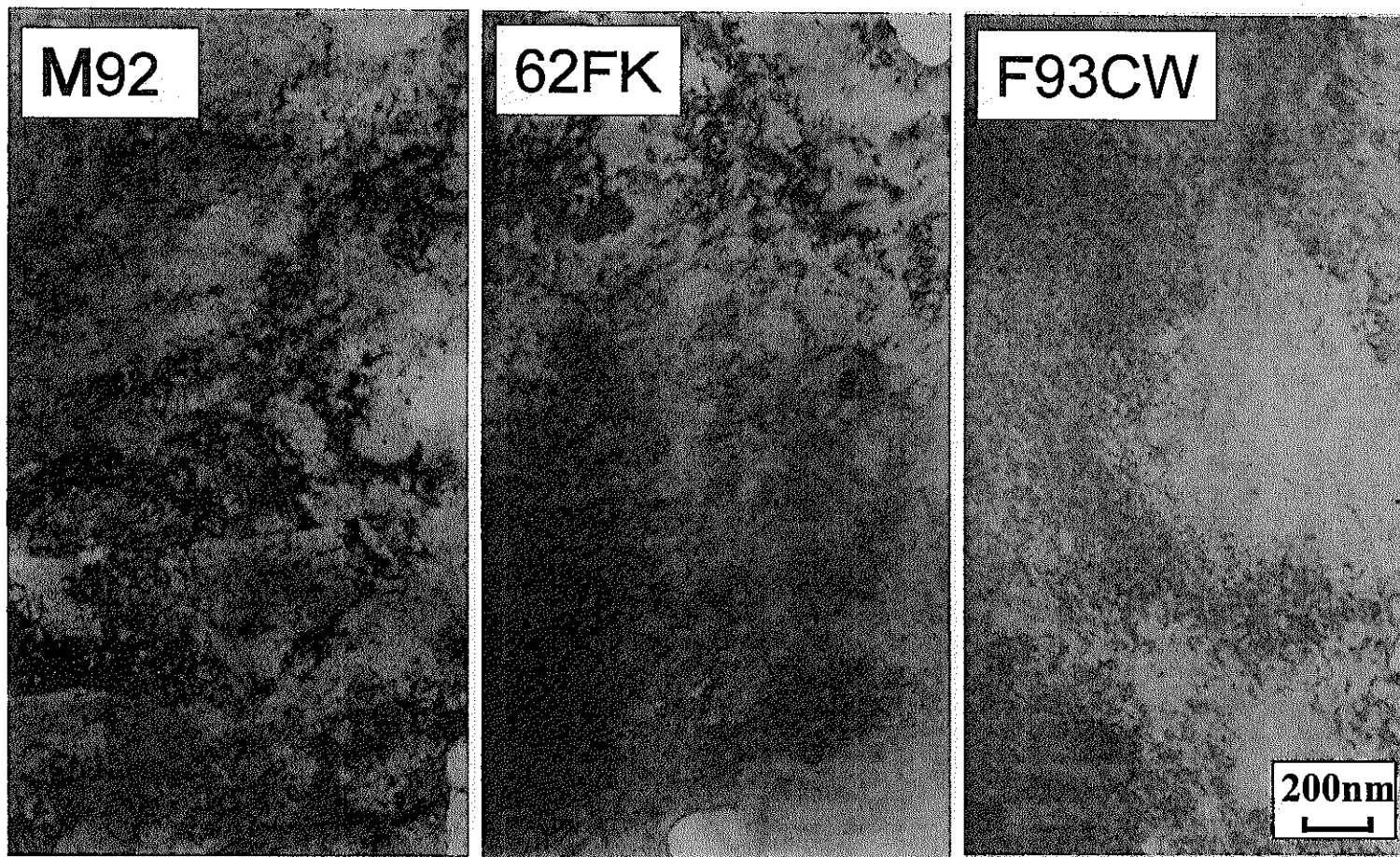


図 4 照射前の内部組織

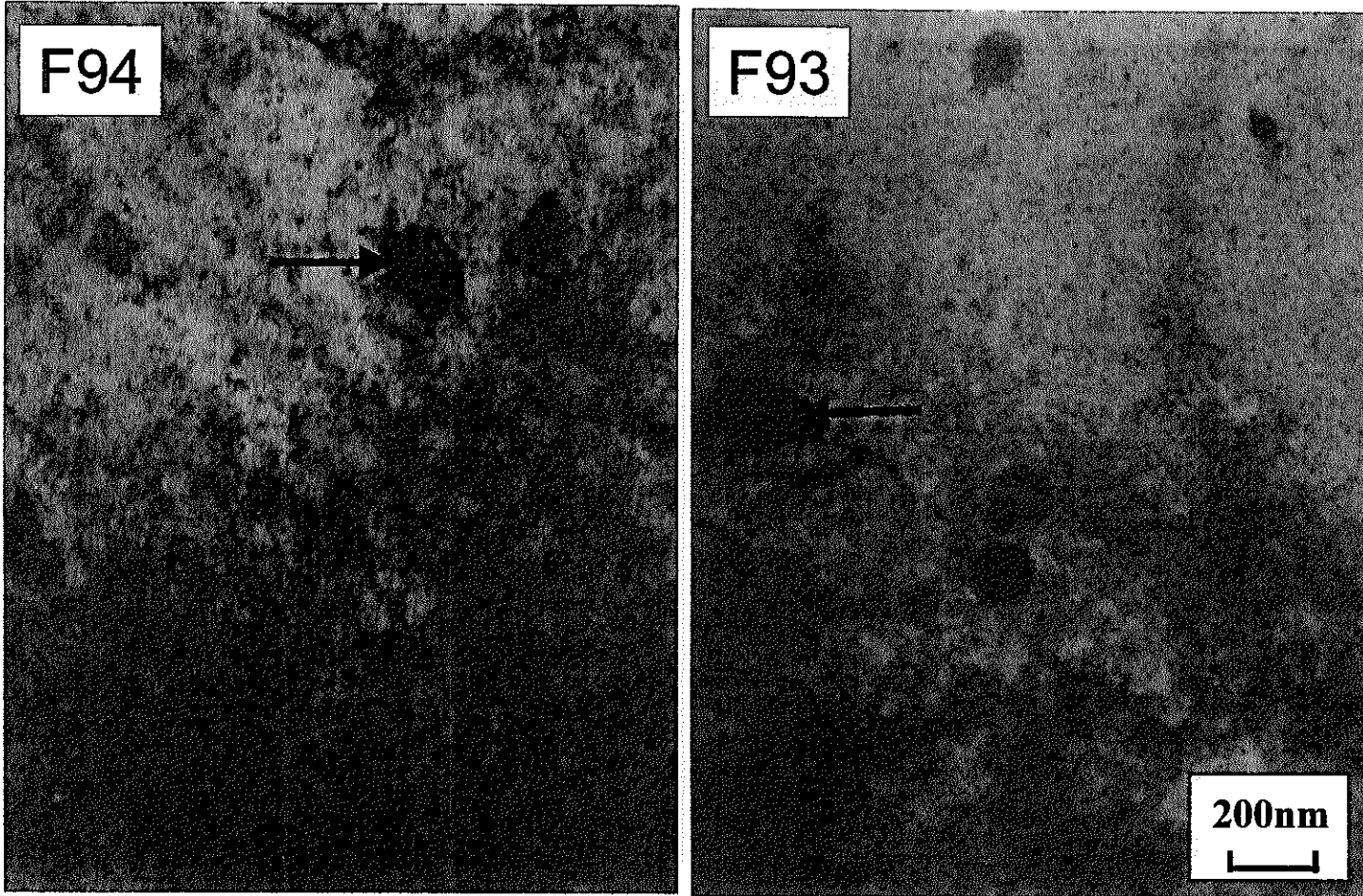


図 5 照射前の内部組織（矢印は析出物を示す。）

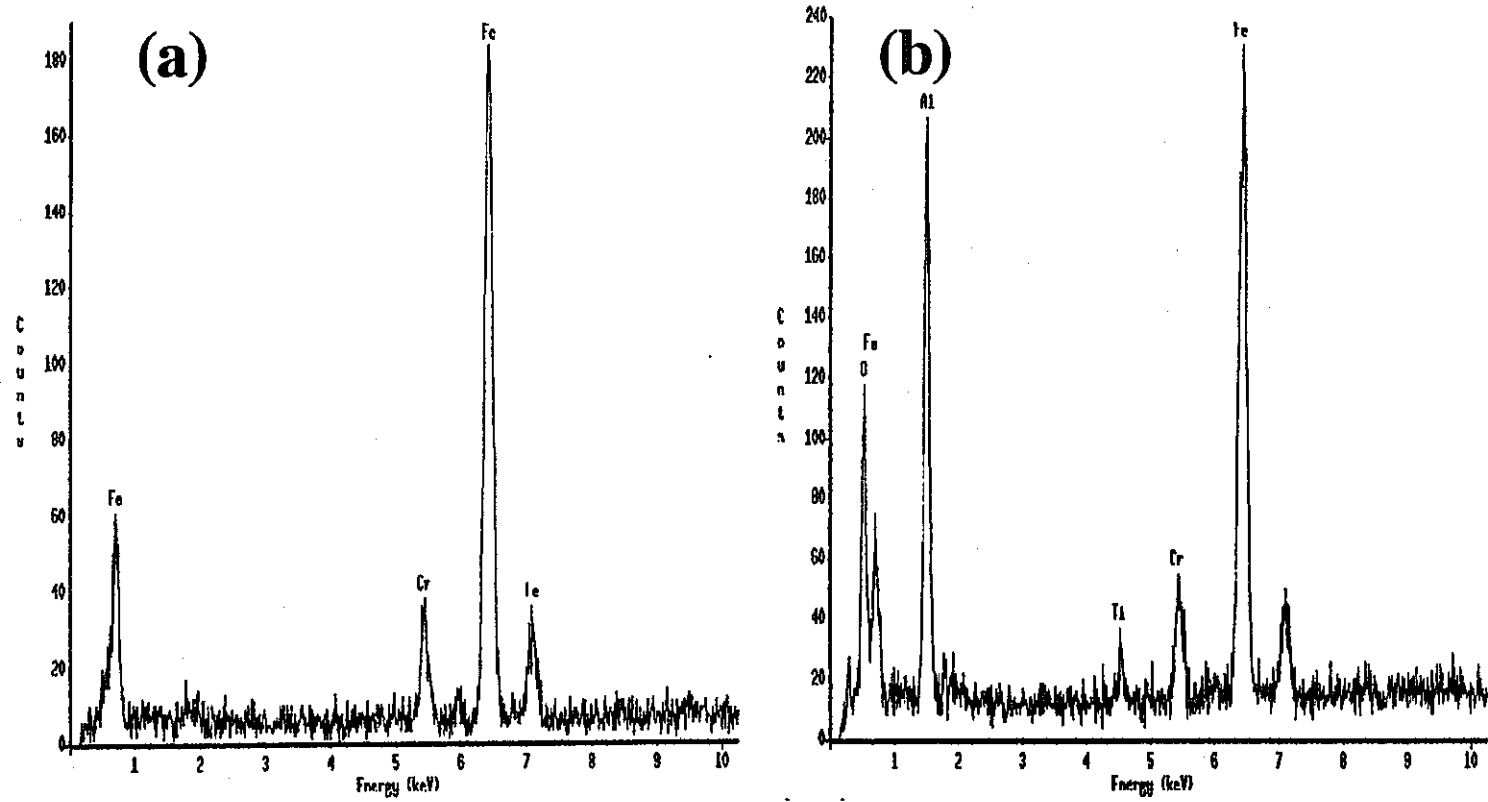


図 6 EDSによる分析結果 (a)マトリクス (b)F94に存在する析出物

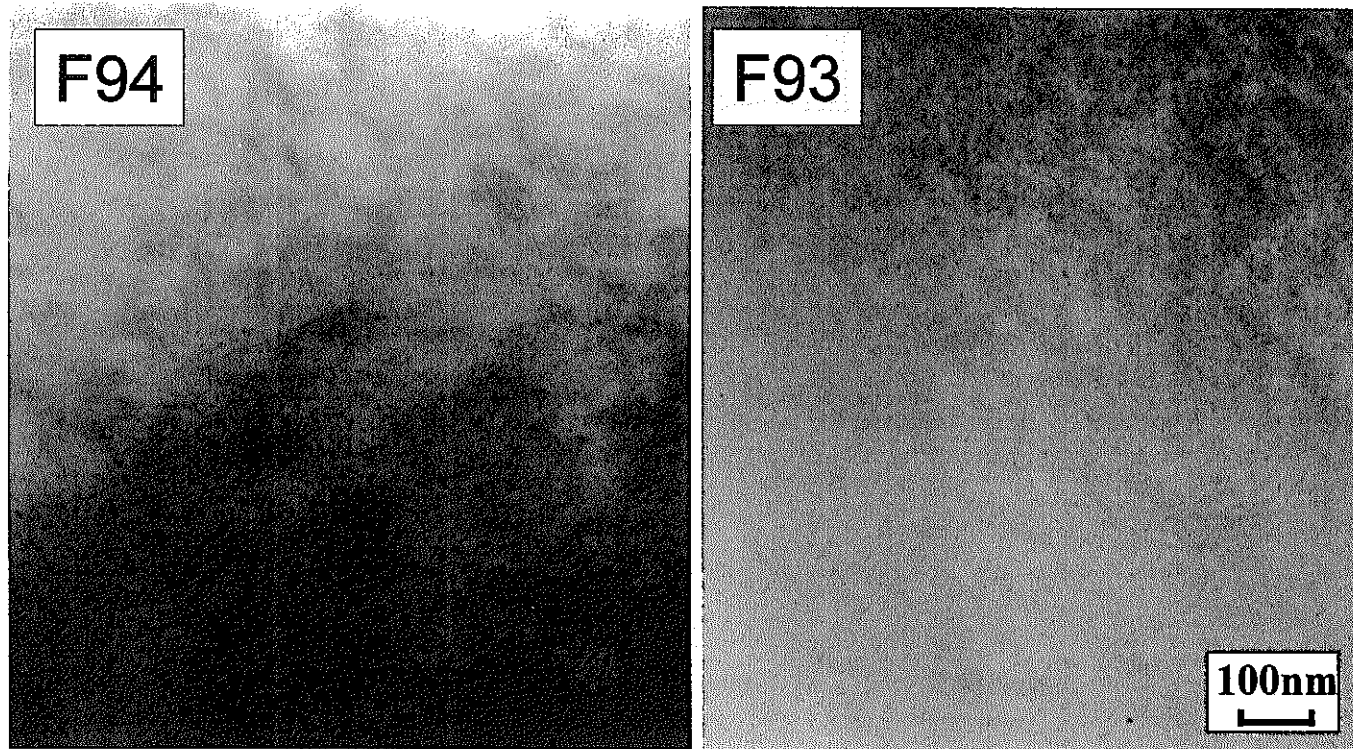


図 7 450℃、50dpa 照射後の内部組織

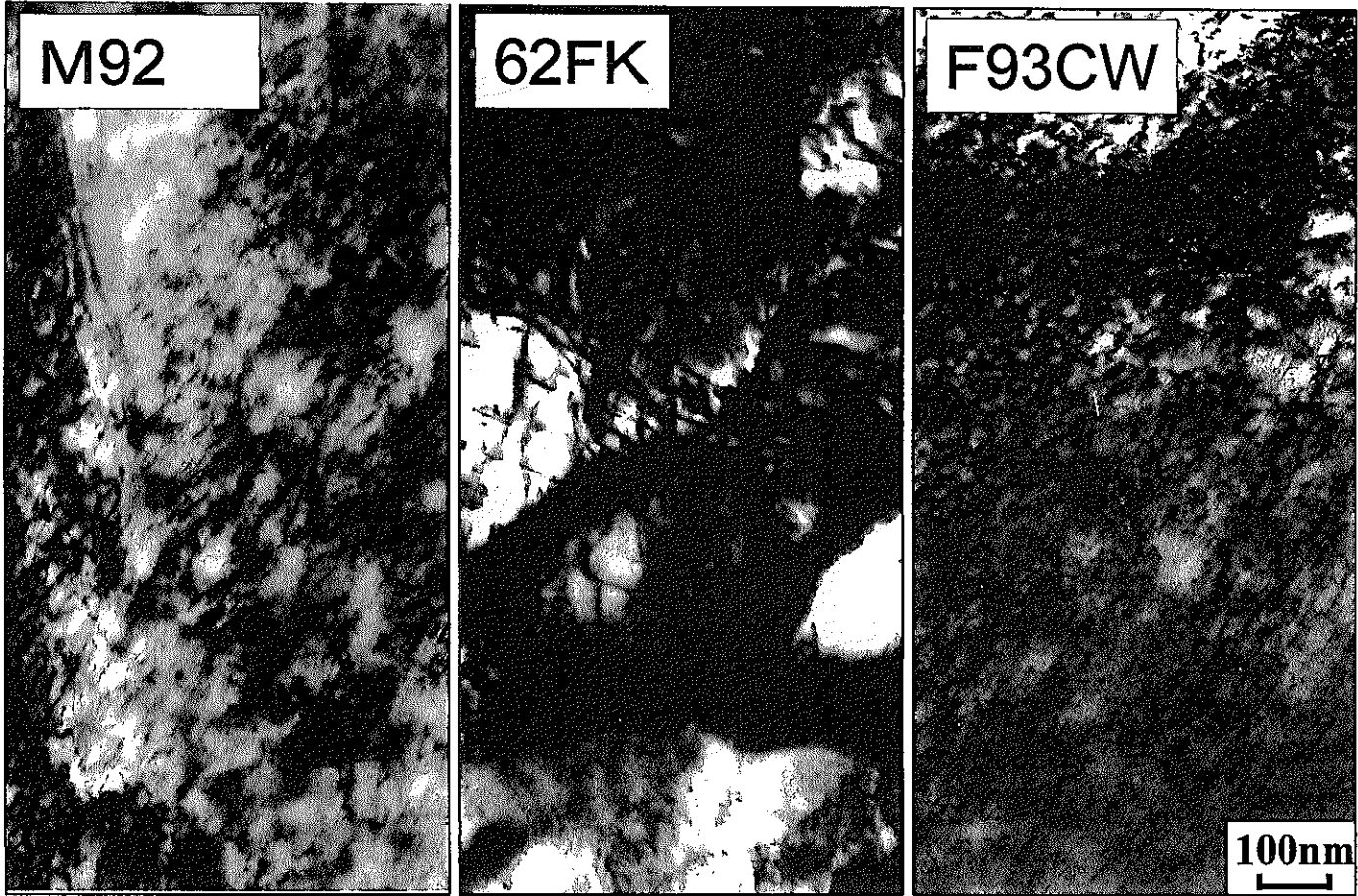


図 8 450℃、70 dpa 照射後の内部組織

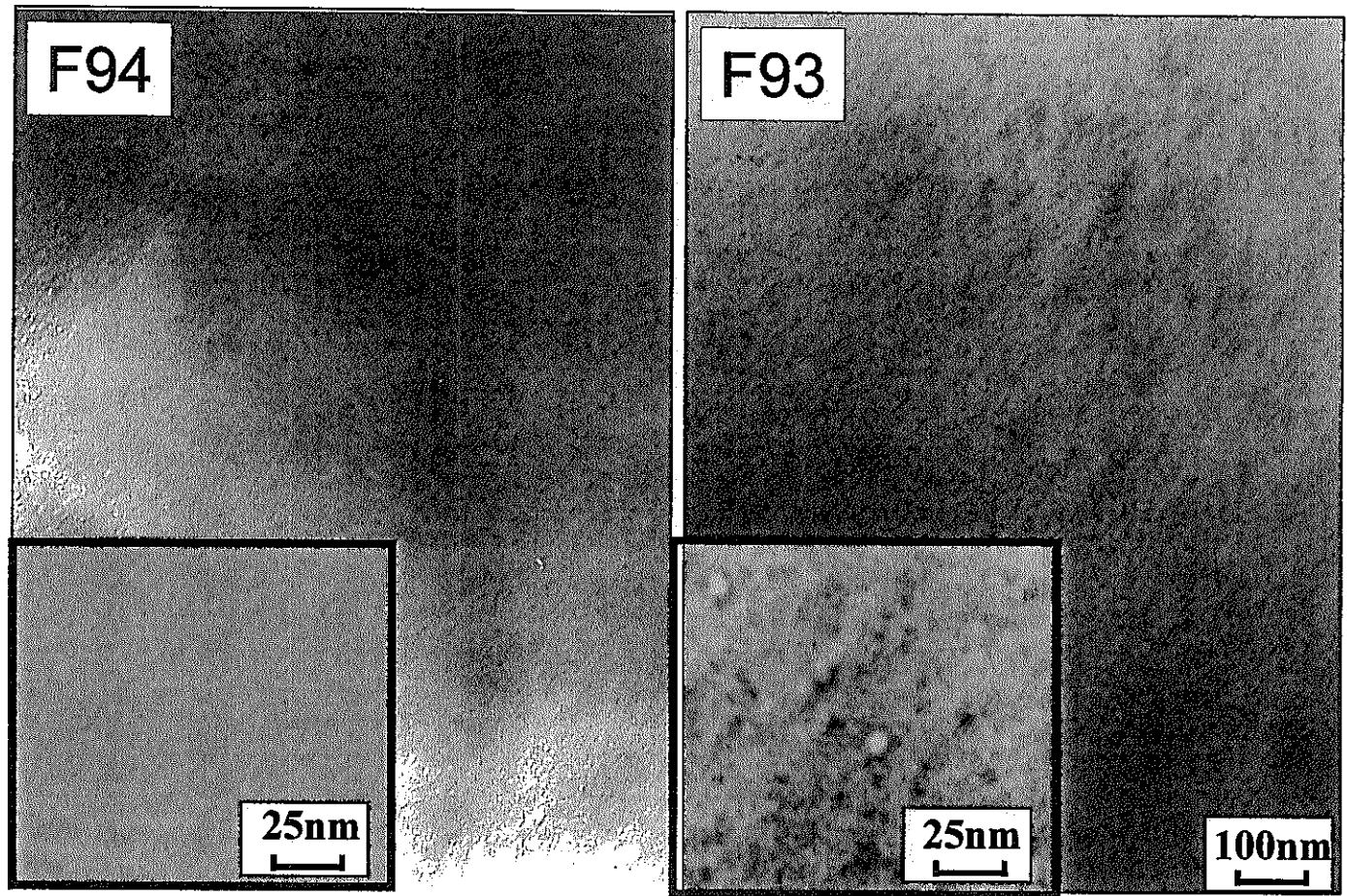


図 9 450℃、70 dpa 照射後の内部組織

試料: Fe-16Cr-17Ni-0.1P

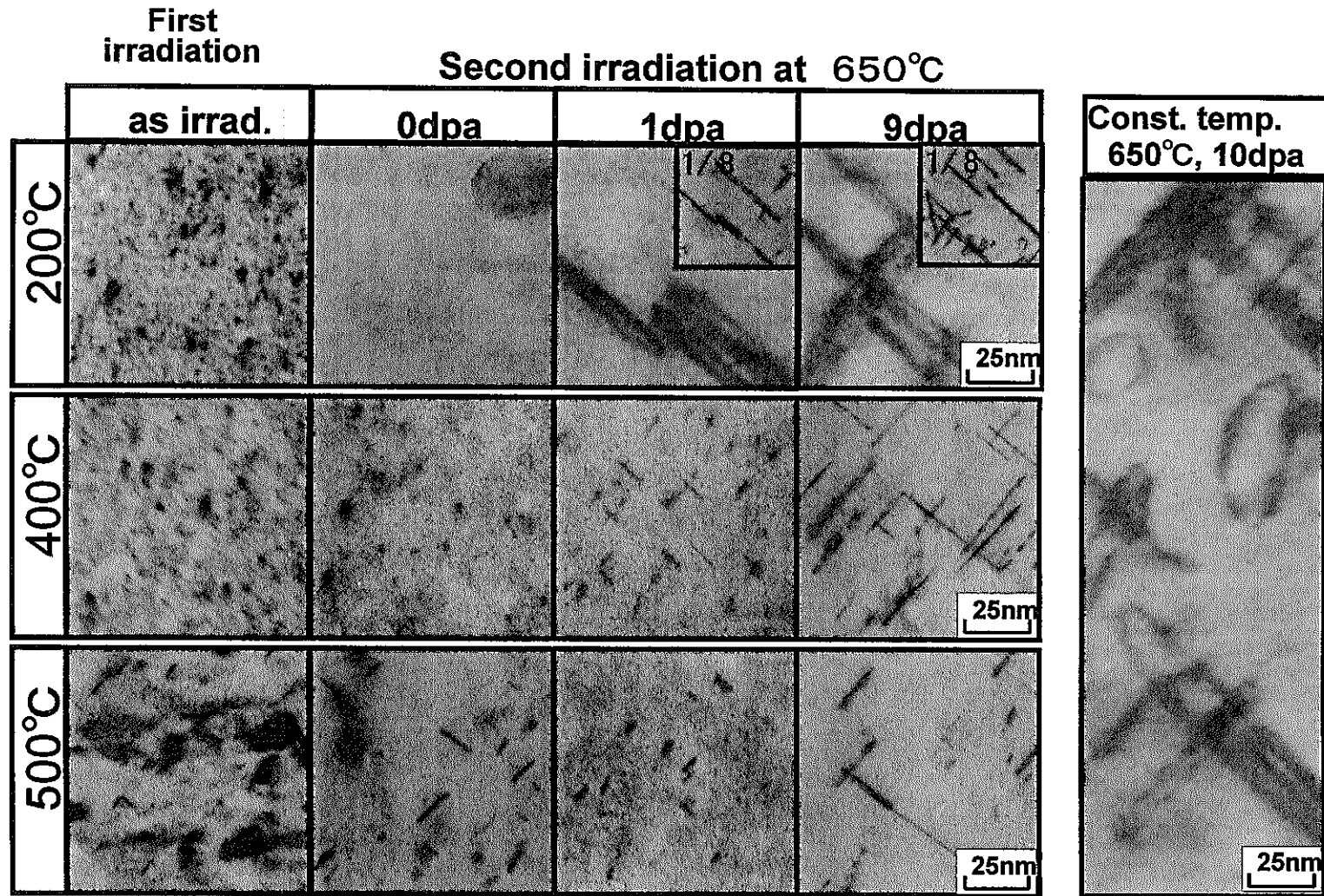


図 10 P 単独添加材の温度変動照射後の内部組織変化 (低照射量)

試料: Fe-16Cr-17Ni-0.1P

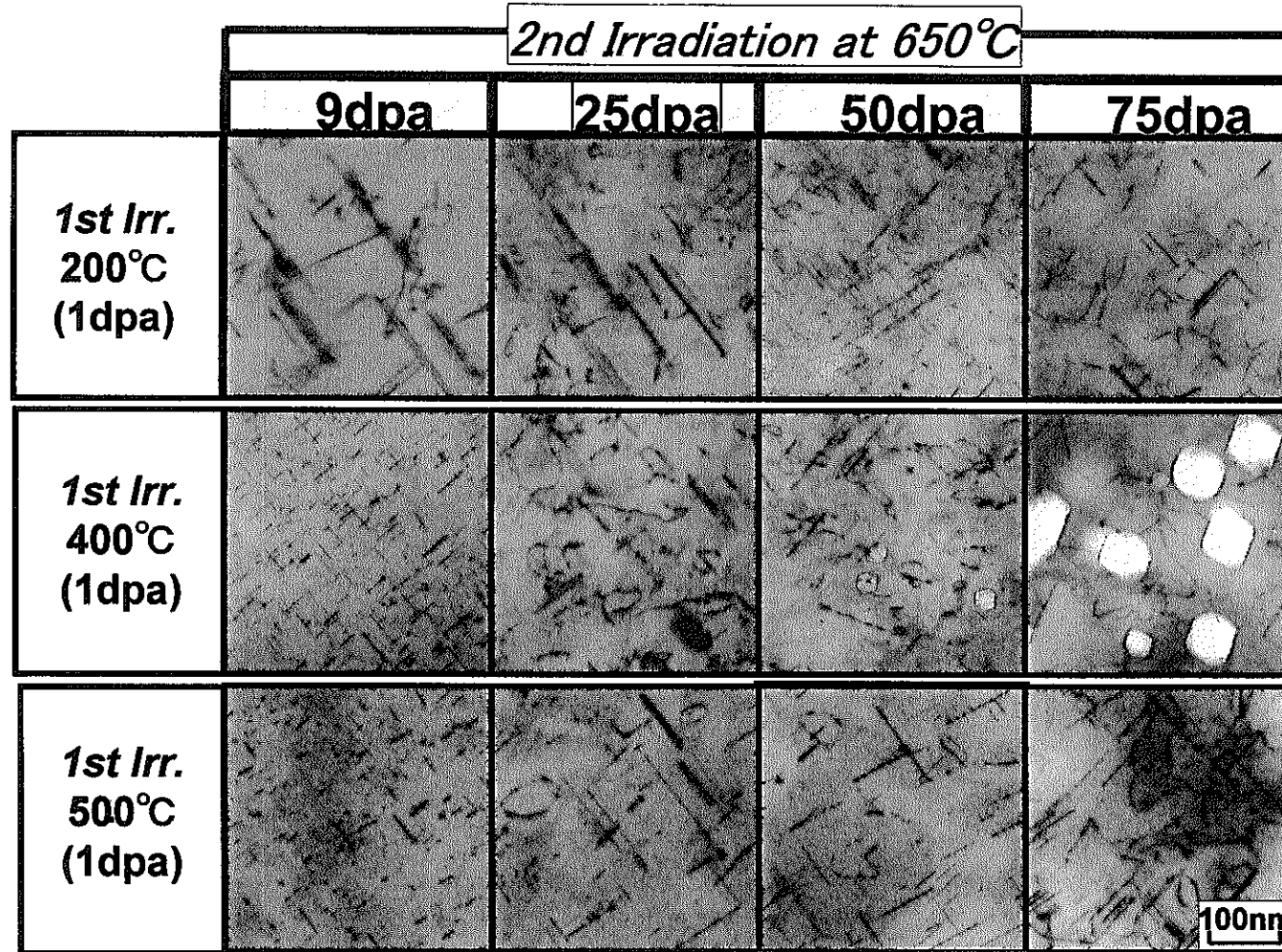


図 11 P 単独添加材の温度変動照射後の内部組織変化 (高照射量)

試料: Fe-16Cr-17Ni-0.25Ti-0.1P

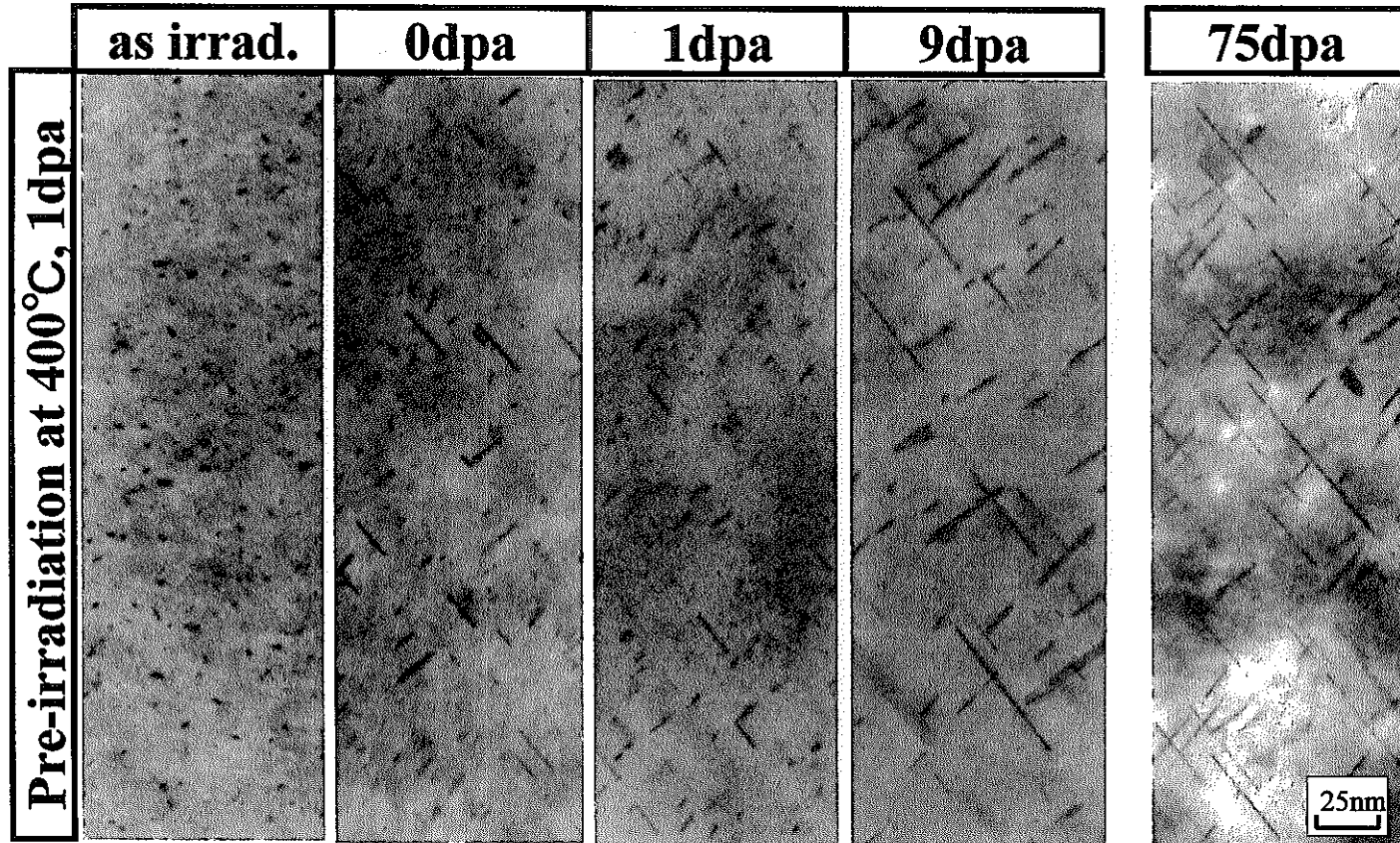


図 12 P、Ti 複合添加材の温度変動照射後の内部組織変化 (高照射量)

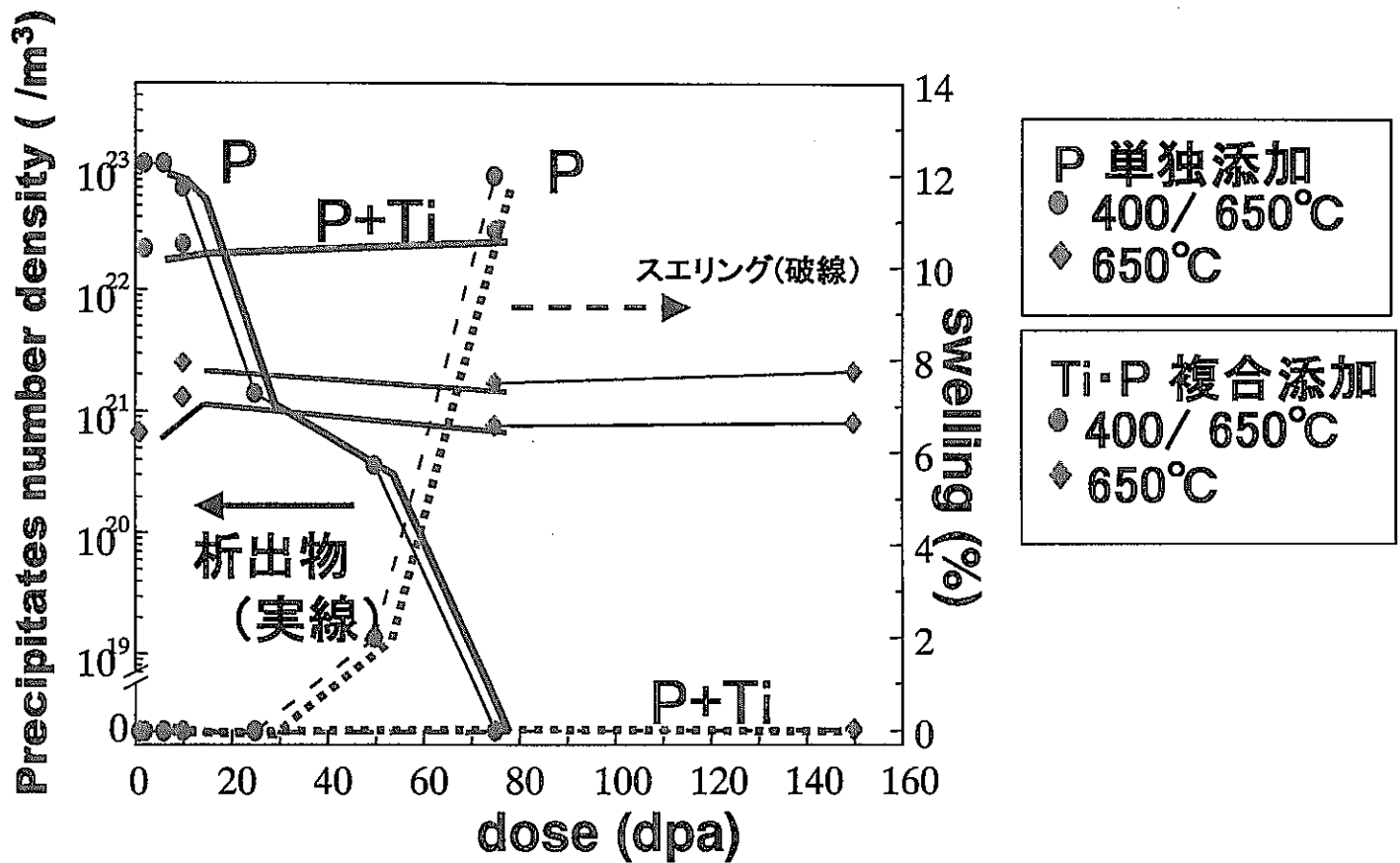


図 13 リン化物の数密度とスエリングとの相関

試料:PNC316

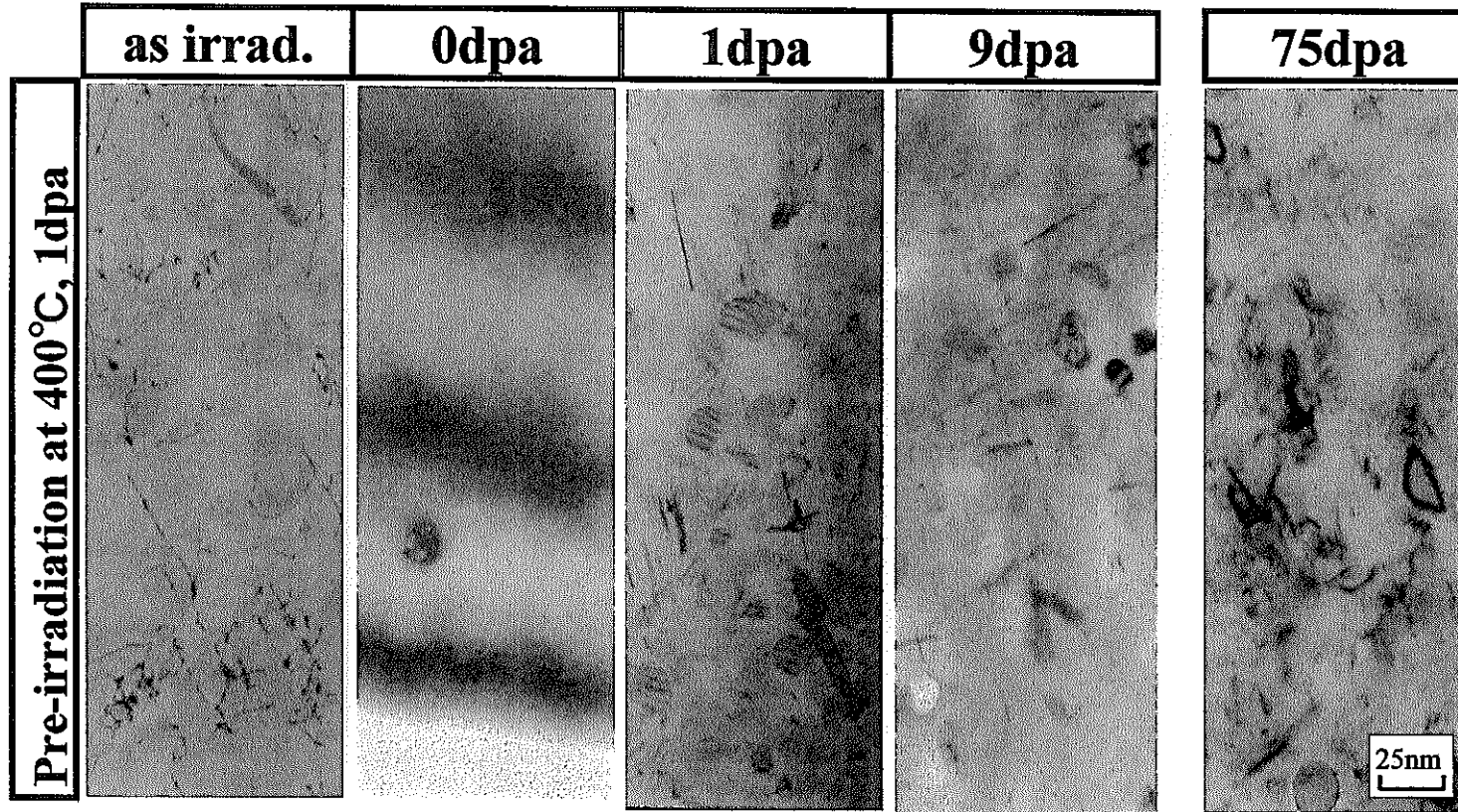


図 14 PNC316鋼の温度変動照射後の内部組織変化 (高照射量)

低温予照射が高温での本照射に及ぼす影響

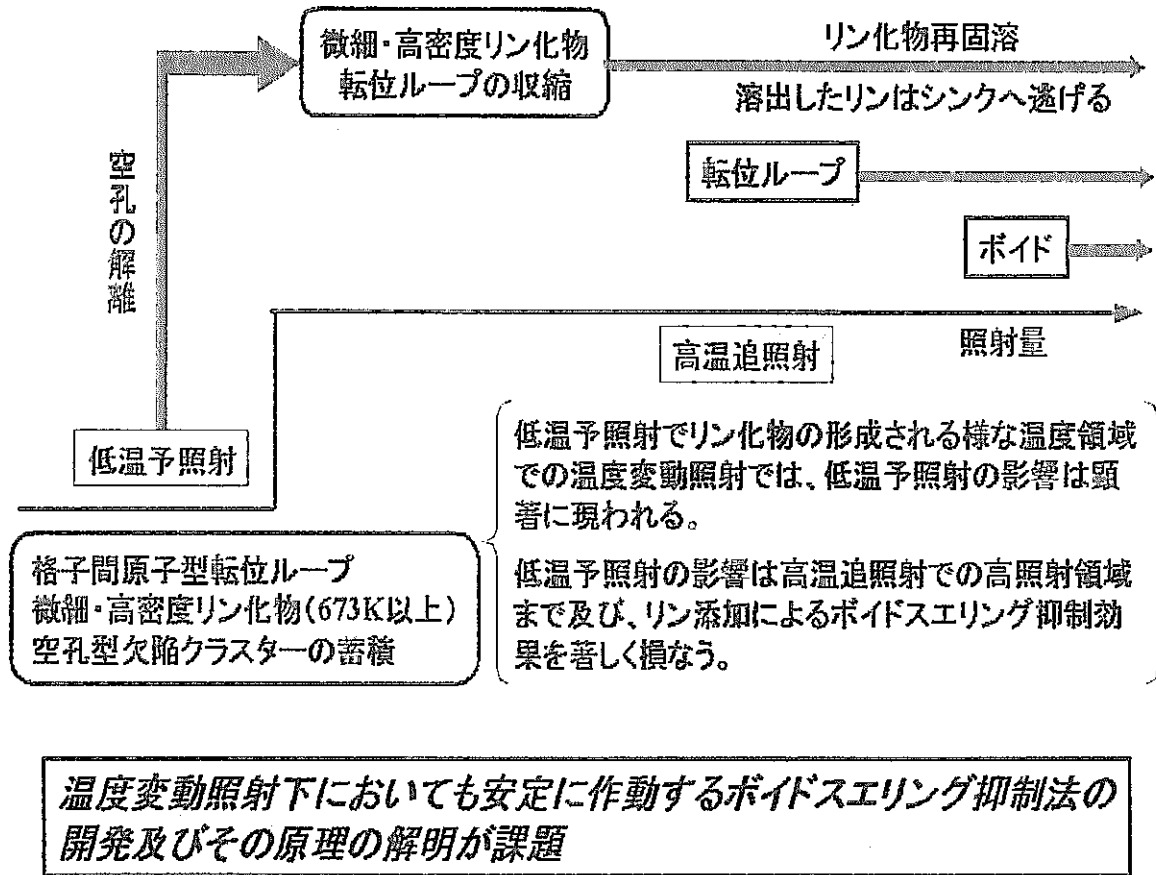


図 15 温度変動照射とリン化物との相関