

高速炉 MOX 燃料用酸素ゲッターの開発 (3)

—チタンロールペレット方式の実現性評価—

Feasibility Study of Oxygen Getter Materials for FBR MOX Fuel (3)
- Evaluation for the Titanium Roll Pellet Method -

森平 正之

Masayuki MORIHIRA

次世代原子力システム研究開発部門
燃料製造技術開発ユニット

Fast Reactor Fuel Fabrication Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

August 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

高速炉 MOX 燃料用酸素ゲッターの開発 (3) —チタンロールペレット方式の実現性評価—

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門

燃料製造技術開発ユニット

森平 正之

(2012年6月18日 受理)

高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト。以下、「FaCT」) では、集合体平均 150GWd/t (集合体ピーク 250GWd/t) の高燃焼度を目指している。このような高燃焼度域では被覆管の内面腐食が従来以上に厳しくなると予想され、照射中における燃料の酸素ポテンシャル上昇の抑制が必要になる。FaCT ではその対策として低 O/M 比ペレットの利用を検討してきたが、量産工程における実現には課題が多いことがわかってきた。

このため、代替法として照射中に生じる余剰酸素を吸収させる酸素ゲッターについての検討を開始し、ペレット型 MOX 燃料に適用する酸素ゲッターオプションの概念の構築と実現性検討を進めてきた。その結果、チタンロールペレット方式が最も有望であるとの評価結果を得たことから、H23 年度にチタンロールペレットの製作性評価、チタン材の酸化特性に係る追加データ取得及びチタンロールペレットの酸化特性評価を行い、製作加工性、余剰酸素吸収の有効性、燃料設計上の要求の充足性の観点から同方式の実現性を見通すことができた。

一方、未評価の事項として、炉心燃料ペレットとゲッターが離れていることの影響評価が残されている。この点については、MOX とチタンの酸素ポテンシャルの差により照射開始後に前者から後者への酸素移動が生じ、その結果 MOX ペレットが低 O/M 化することが考えられ、その場合は両者の物理的な距離は問題にならなくなることから、その確認を早期に行うことが望まれる。

**Feasibility Study of Oxygen Getter Materials for FBR MOX Fuel (3)
- Evaluation for the Titanium Roll Pellet Method -**

Masayuki MORIHIRA

Fast Reactor Fuel Fabrication Technology Development Unit,
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 18, 2012)

In the FaCT project (Fast reactor Cycle Technology development) proceeded by JAEA since 2006, high bundle peak burn-up to 250 GWd/t is targeted. Cladding inner corrosion is one of the life control factors of FBR MOX fuels. Because it increases with extension of burn-up, significant corrosion is expected in the high burn-up. Considering the excess oxygen during fission is the cause of the corrosion, reduction of initial O/M ratio of MOX fuel pellets is one of the solutions. But it is not always easy to obtain low O/M ratio pellets especially in the mass production. Oxygen getter option is an idea to coexistence of oxidizable metal fragments in a fuel element as an excess oxygen absorber. In this case, significantly low O/M ratio pellet is not necessary anymore. That the reason why feasibility study for oxygen getter options which was focused on pellet type MOX fuel has been conducted.

In the previous study, an option was proposed to locate getter titanium in the lower end of the upper axial blanket region of a fuel element. Also the titanium roll pellet method was proposed to reduce the smear density of the getter titanium to absorb the swelling during the oxidation. In this study, producibility of titanium roll pellets and their oxidation behavior were evaluated. Additional oxidation data for titanium was also obtained.

By the confirmation of the producibility of the roll pellets, the effectivity on oxygen absorption and the feasibility to the fuel design requirements, it can be concluded that the titanium roll pellet method is feasible.

Keywords : MOX, O/M, Getter, Cladding, Corrosion, FCCI, High Burn up

目 次

1. 序論	1
2. チタンロールペレットの製作性評価	2
2.1 チタンロールペレット方式の概要	2
2.2 製作上の課題	2
2.3 試験方法	3
2.4 結果と考察	3
2.5 まとめ	4
3. チタン材の酸化特性評価	5
3.1 目的	5
3.2 試験方法	5
3.2.1 650℃酸化試験	5
3.2.2 低酸素ポテンシャル下における酸化試験	5
3.3 結果	5
3.3.1 650℃酸化試験	5
3.3.2 低酸素ポテンシャル下における酸化試験	5
3.4 考察	6
3.4.1 加熱温度の影響	6
3.4.2 酸素ポテンシャルの影響	6
3.4.3 燃料要素内の条件との比較	6
3.5 まとめ	7
4. チタンロールペレットの酸化特性評価	8
4.1 目的	8
4.2 試験方法	8
4.3 結果	8
4.4 考察	9
4.5 まとめ	9
5. ゲッター装荷量の推定	10
6. まとめと今後の課題	11
7. 結言	12

謝辞	-----	13
参考文献	-----	13

Contents

1. Introduction	1
2. Evaluation of producibility of titanium roll pellets	2
2.1 Conception of the titanium roll pellet method	2
2.2 Requirements on production	2
2.3 Evaluation procedure	3
2.4 Results and Discussions	3
2.5 Conclusion	4
3. Evaluation of the oxidation behavior of titanium	5
3.1 Objective	5
3.2 Test procedure	5
3.2.1 Oxidation test at 650°C	5
3.2.2 Oxidation test under the lower oxygen potential	5
3.3 Results	5
3.3.1 Oxidation test at 650°C	5
3.3.2 Oxidation test under the lower oxygen potential	5
3.4 Discussion	6
3.4.1 Influence of temperature	6
3.4.2 Influence of oxygen potential	6
3.4.3 Comparison with the in-pile condition	6
3.5 Conclusion	7
4. Evaluation of the oxidation behavior of titanium roll pellets	8
4.1 Objective	8
4.2 Test procedure	8
4.3 Results	8
4.4 Discussion	9
4.5 Conclusion	9
5. Estimation of loading amount of oxygen getter material	10
6. Future subject	11
7. Concluding remarks	12

Acknowledgement	-----	13
Reference	-----	13

表リスト

Table 3.1 チタン材の酸化特性評価の条件 14
 Table 3.2 チタン試料の重量増加率 14
 Table 4.1 チタンロールペレットの酸化特性評価の条件 14

図リスト

Fig.2.1 チタンロールペレット方式の概念図 15
 Fig.2.2 チタンロールペレット製造上の課題 15
 Fig.2.3 ロール加工治具の外観及びセット状態 16
 Fig.2.4 チタンロールペレットの製作試験結果 16
 Fig.2.5 治具内径とロール外径の相関 17

Fig.3.1 低酸素ポテンシャル酸化試験の装置概略図 17
 Fig.3.2 チタンディスク表面酸化層の断面金相 18
 Fig.3.3 チタン酸化層の厚さの温度、 ΔG_{O_2} 依存性 19
 Fig.3.4 MOX・チタンの酸素ポテンシャルの比較 20
 Fig.3.5 チタンディスク表面酸化層の SEM/EDX 結果 ($-349\text{kJ/mol} \times 50\text{h}$) 21

Fig.4.1 酸化前後の外観比較 22
 Fig.4.2 酸化前後の断面金相比較 22
 Fig.4.3 外周部と中心部の断面組織比較 23
 Fig.4.4 ロールペレット高さ方向の伸び状態 23
 Fig.4.5 クラックの詳細状態 24
 Fig.4.6 クラックの形成状態 24

Fig.5.1 ゲッターと MOX の位置関係の影響 25
 Fig.5.2 MOX からゲッターへの酸素移動によるペレットの低 O/M 化 25

This is a blank page.

1. 序 論

高速増殖炉サイクル実用化研究開発（以下、「FaCT」）では集合体平均 150GWd/t（集合体ピーク 250GWd/t）の燃焼度を目指しているが、このような高燃焼度を達成するためには被覆管内面腐食対策が不可欠となる。内面腐食は燃料の酸素ポテンシャルと密接な関係があり、亜化学量論組成（O/M 比<2.00）ではほとんど生じないことが知られている[1]。このため FaCT では、燃料の初期 O/M 比を 1.95 程度に下げた低 O/M 比ペレットを用いることにより内面腐食の開始を遅延させる方法を目指してきた[2]。しかし、低 O/M 比のペレットを得るためには長時間の熱処理が必要であり、量産規模の大型電気炉において高精度の酸素ポテンシャル制御を行うことが要求される。同時に、低 O/M 比の MOX は酸素感受性が高く、自己発熱量の大きい高次化 Pu や低除染 MA 含有燃料ではペレット焼結後の再酸化防止も大きな課題となる。これらを勘案すると、量産工程においてペレットの O/M 比を大幅に下げ所定の仕様に収めることは容易ではなく、技術的に対応できたとしても燃料製造コストへの影響は避けられないと考えられるようになった。このため、低 O/M 比ペレット法に替わる方法として酸素ゲッター法についての検討を開始した。

酸素ゲッター法は、照射中に生じる余剰酸素を燃料ピン内に装荷した吸収材によって除去することにより酸素ポテンシャルの上昇を抑える方法であり、概念としては古くから存在するもので、近年ではロシアがパイパック燃料に適用して 32.3%の高燃焼度を達成した例があるが[3]、ペレット燃料についての検討はほとんど行われていない。このため、平成 19 年度に MOX ペレット燃料用の酸素ゲッターの概念を具体化しその実現性を評価する作業に着手し[4]、平成 22 年度までに、チタン箔をペレット状に巻いたチタンロールペレットを燃料要素の上部軸方向ブランケット領域の下端に装荷する方式が最も有望であるとの評価結果を得た[5]。

H23 年度は、チタンロールペレットの製作性評価、チタン材の酸化特性に係る追加データ取得及びチタンロールペレットの酸化特性評価を行い、その結果、ロールペレットの製作性、余剰酸素吸収材としての有効性、燃料設計上の要求への充足性の観点から同方式の実現性について見通しを得ることができた。

2. チタンロールペレットの製作性評価

2.1 チタンロールペレット方式の概要

酸素ゲッターの材質については、酸素ポテンシャル、融点、共存性、中性子吸収断面積などを勘案してチタンを選定している[4]。また、燃料要素内の装荷位置については、チタン及びその酸化物が熔融や被覆材、燃料との共晶を生じるような高温にならないことが必要である一方、チタンの酸素吸収すなわち酸化が生じるだけの温度が必要であり、後者については700°C付近以上であることがわかっている[5]。これらの条件を満足する位置は上部軸方向ブランケット領域の下端付近のみであることから、そこにペレット等の形状にして装荷することを考えた。

一方、チタンがTiO₂まで酸化すると密度比の計算上180vol%に体積膨張することから、被覆管への機械的応力を回避するためにはチタンペレットの密度を50%TD程度に下げる必要がある。その方策として粒子充填、多孔質体などのオプションを検討した。しかし、温度の低い領域にこれらを装荷してもクリープ変形が期待できず空隙が膨張の吸収代にならないと考えられることから、リボン状のチタン箔をペレット状に巻いたチタンロールペレット方式を提案した。(Fig.2.1)

ロールペレット方式の利点として以下が挙げられる。

- ・ 酸化時の体積膨張が箔の厚さを増す形で現れるため、箔と箔の間隙で吸収できる。
- ・ チタン箔の巻き加減によってスミア密度を任意に調整できる。
- ・ 比表面積が大きいいため酸素吸収効率が低い。
- ・ ハンドリング性に優れ、ピン横置き状態での被覆管装荷が可能である。

2.2 製作上の課題

チタン箔を巻いてロールペレットを製作する概念については次のような懸念があった。

- ・ スプリングバックの大きいチタン箔を大きな曲率で曲げられることができるか？
- ・ 箔の端をスポット溶接、接着、リベット等により留めることはできないが、固定なしにロールの外径を制御できるか？
- ・ 箔と箔の間隙を適切に設けることができるか？

試作の結果、チタン箔をロールにすることはできたが、手を離すと巻き戻りを生じてしまい、その傾向は厚さ50μmの箔の場合に顕著であった。(Fig.2.2 (a)) また、100μmの箔の場合はロールを管に装荷することにより箔-箔の間隙が形成されたが、50μmの場合は外周部への偏在が著しく箔-箔は密着した状態になった。(Fig.2.2 (b))

これらの結果から、以下の課題が挙げられた。

- ・ 温度の高いUO₂ペレット中央部との接触面積を増加させることによりチタンに十分な温度を与えるためにロール中心孔を縮小化する。
- ・ 箔の利用目的はチタンの比表面積を大きくして酸素との反応性を高めることにあるため、箔同士の密着による実効的な比表面積の低下を避ける。

対策として以下を提案し、その効果の確認をロールペレットの加工精度や箔厚の影響についての評価と合わせて行うことにした。

- ・ 巻き戻りは箔のスプリングバックによるものであり、圧延の繰り返しの伴う加工硬化が原因であることから、熱処理による箔材の残留応力除去を行う。
- ・ 残留応力除去後の箔を大きな曲率でロール化すれば新たな歪が発生するため、ロールを治具にセットして拘束した状態で熱処理を行い、巻き加工後に再度残留応力を除去する。
- ・ 上記の熱処理を行うための治具を開発し、その際、心棒の直径を最小にすることによりロール中心孔の縮小化を図る。

2.3 試験方法

チタンロールペレットの仕様は、内径 9mm の被覆管（実証炉燃料の 8.98mm に準拠）に高さ 10mm、スミア密度 50%TD のロールペレットを装荷する場合を想定して設定した。チタン箔は 100 μ m と 50 μ m の二種類の厚さのものを扱い、スミア密度を 50%TD とするために前者は 305mm、後者は 610mm のテープ状に切断して使用した。

これらの箔を加工硬化除去のため 530 $^{\circ}$ C の真空中における熱処理を行い、次に心棒に巻き付けてロール化し、治具にセットした状態で再度 530 $^{\circ}$ C の真空中における熱処理を行った。ロール加工治具の外観とセット状態を Fig.2.3 に示す。

治具のサイズは、基準とするチタンロールペレットの外径を 8.8mm ϕ とし、それに対して -1.0、-0.5、 \pm 0、+0.5 となる 7.8、8.3、8.8、9.3mm に設定した。

得られたロールペレットは模擬被覆管に挿入した状態で樹脂固定して金相試験を行った。

2.4 結果と考察

① ロール中心孔の縮小化

巻き加工治具の中心棒径を 3mm から 2mm に変更することによりチタンロールの中心孔サイズは 2.2~2.4mm ϕ に縮小された。中心孔径と中心棒径の差は 0.2~0.4mm であった。チタンロールペレットは MOX ペレットのような発熱体ではなく中心孔サイズの熱設計への影響はほとんどないため、必要な仕様を満たすものと考えられる。

② 層間隔の確保、均等化

巻き加工前に熱処理を行うことにより 50 μ m の箔の場合も偏在を生じなくなり、箔と箔の間隔が確保された。(Fig.2.4) ロールの巻きは 100 μ m より 50 μ mの方がきめ細かであった。

③ 外径制御精度

熱処理後のチタンロールの外径は、治具内径の -2%以内 (-70~-200 μ m) の範囲に収まっており、Fig.2.5 に示すように製品ロール外径の治具内径に対する良好な相関性が見られることから、適切なサイズの治具を選定することにより製品ロール外径を制御できると考えられる。前記のとおりチタンロールペレットは発熱体ではないため、被覆管とのギャップ幅についても厳密さは要求されないことから、設計上の要求を満たすことは十分可能であると考えられる。

④ 箔厚の感度評価

箔-箔の間隔や巻きのきめ細かさは $50\mu\text{m}$ の方が優れており、外径制御精度や中心孔サイズの差も見られず、ハンドリング上も箔の薄さに起因する問題は見られなかった。比表面積の観点からは薄い方が望ましいことから $50\mu\text{m}$ の箔が推奨される。

なお、想定する使用条件下におけるチタンの酸化速度は前回までの試験結果から約 $1\mu\text{m/h}$ であることがわかっており [5]、厚さ $50\mu\text{m}$ の箔の両面から酸化が進む場合は 25h 程度で全体が酸化すると考えられる。したがって、ハンドリング性を犠牲にしてまでさらに薄い箔の使用する必要性はないと考えられる。

2.5 まとめ

チタンの薄箔からロール構造の低密度ペレットを製作することが可能であり、燃料設計上要求される加工精度が得られることを確認した。また、本試験では手作業でロールペレットを製作したが、プロセスは至極単純であることから自動化、量産化に特段の困難はないと考えられる。したがって、チタンロールペレットの製作性については十分に実現性があるものと判断される。

3. チタン材の酸化特性評価

3.1 目的

チタンの酸化についてはこれまでに、700°Cにおいて十分速いことを確認しているが、低温側については580°Cで酸化しないことを示すデータを得ているだけである[5]。しかし、ペレット中心温度が728°Cに達する上部軸方向ブランケット領域下端でも、ペレットの表面温度は621°Cに留まることから、700°C未満の温度域における酸化特性を評価しておく必要があり、今回650°Cについての評価を行った。

酸素ポテンシャルについては、試験実施の容易さや試験加速の意図から700°C・O/U比2.00平衡相当の酸素ポテンシャル下のデータを得ているが、これらは想定するMOXペレットのO/M比に比べて高い条件におけるものとなっていることから、O/M比<2.00相当の酸素ポテンシャル下におけるチタンの酸化特性評価を行った。(Table 3.1 参照)

3.2 試験方法

3.2.1 650°C酸化試験

従来と同じ試験体系において温度のみを650°Cに下げて試験を実施した。試験試料についても10mmφ×3mmのディスク材を半割りしたもので、加熱は4°C/minで昇温したのち200h行った。

3.2.2 低酸素ポテンシャル下における酸化試験

従来の酸化特性試験ではCO/CO₂混合ガスを用いて酸素ポテンシャルの制御を行ったが、O/M比<2.00相当の場合はガスミキサーの調整範囲を超えることから、Cr/Cr₂O₃($\Delta G_{O_2}=-629\text{kJ/mol}$ 、700°C)を酸素バッファ材として用いることとし、Cr/Cr₂O₃粉末(重量比2.6、装荷重量407g)を造粒してチタン試料とともに石英管の中に封入して試験を実施した。その際、静的な状態ではCr-Cr₂O₃-Oの局所的な平衡が形成されるに留まりチタン試料に十分な酸素が供給されない懸念があったことから、アルゴンガスを循環させる体系を設けた。(Fig.3.1)

チタン試料は3.2.1と同じ半割ディスク材を用いた。試験温度は700°Cと750°Cとした。

3.3 結果

3.3.1 650°C酸化試験

加熱中の平均温度は650.6°Cであった。CO/CO₂混合ガスによって調整した酸素ポテンシャルは約-349kJ/molであり、O/U比2.0012に相当するものであった。

加熱後のチタンディスクは金属光沢がなくなり黒味がかった。試料断面金相の結果、試料表面に厚さ約50μmの連続的な相が認められた。

3.3.2 低酸素ポテンシャル下における酸化試験

加熱中の平均温度は702.6°Cと751.9°Cであった。酸素ポテンシャルの平均はそれぞれ

-499kJ/mol と -542kJ/mol であり、いずれも Cr/Cr₂O₃ の -629kJ/mol より高かった。

加熱後のチタンディスクの外観は、700°C加熱後のチタンディスクは金属光沢がなくなり若干の変色が生じた。750°C加熱後の場合は金属光沢がなくなるとともに、白っぽいすみとガスフロー上流側のエッジ部の黒化が見られた。

断面金相観察ではいずれの試料にも酸化物層は認められなかった。各試験試料の断面金相写真を既取得のデータとともに Fig. 3.2 に示す。また、酸化層の厚さの時間変化をプロットしたグラフを Fig. 3.3 に示す。

3.4 考察

3.4.1 加熱温度の影響

酸素ポテンシャル-349kJ/mol において、加熱温度を 700°C から 650°C に下げることによって酸化物層の厚さは 209μm から 50μm に減少したが、650°C 以上であればチタンが酸素吸収材として機能することがわかった。

3.4.2 酸素ポテンシャルの影響

試験中の酸素ポテンシャルが Cr/Cr₂O₃ の -629kJ/mol に達せず -499kJ/mol 止まりであったのは装置の微小リークのためと考えられ、-629kJ/mol に対応する酸素分圧は 10⁻³⁴atm と非常に低いことから、スウェージロック等の継手を多用した装置体系でこのレベルの気密性を達成するのは困難であったものと考えられる。

-499kJ/mol の金相組織にはチタン酸化物を確認できなかったが、Table 3.2 に示すように -349kJ/mol・50h のときとほぼ同じ重量増加が生じていることから同程度の酸素が吸収されていることは明らかである。このことから、チタンに吸収された酸素は α-Ti(O) を形成していると推定される。Fig. 3.4 の -349kJ/mol・50h の試料の EDX 分析の結果は、酸化物相に先行する形で α-Ti(O) 相が生成していることを示している。αチタンの酸素溶解度は 14.5wt% [6] と報告されており、重量増加から推定した今回のディスク材中の酸素量は約 9% に相当する。

-499kJ/mol では酸化物が形成されなかった理由として、酸素分圧が極端に低かったことが考えられる。すなわち -499kJ/mol の酸素分圧は 10⁻²⁷atm であり -349kJ/mol の 10⁻¹⁹atm より 8 桁も低い。それによりチタン表面への酸素の衝突頻度が低くなった結果、酸化物の生成よりも試料深部への固溶の進行が優先されたことが推定される。750°C の場合は、温度は高くなったが酸素分圧が 1 桁低下した (10⁻²⁸atm) ために重量増加率の差が僅かであったものと考えられる。

いずれの場合も、チタン全体で酸素が飽和すれば酸化物を生成するようになると考えられ、また本試験では 3mm 厚のディスク材を用いたが、実際の燃料に装荷するゲッターは 50 μ m 厚の箔であり、その比表面積は今回の半割ディスクの 15 倍あることから、より早期に酸素の固溶が飽和してチタンの酸化物に至ると考えられる。

3.4.3 燃料要素内の条件との比較

照射中の燃料要素内の酸素ポテンシャルは MOX の最高温度部位に支配されると考えられ、

実証炉燃料の定常照射時の MOX ペレットの最高温度 1670°C と O/M 比 1.98 より、燃料要素内の酸素ポテンシャルは -409kJ/mol 程度になると推定される。今回これより低い -499kJ/mol でチタンの酸化が確認されたことから、燃料要素内に装荷したチタンは酸素吸収材として機能すると判断することができる。(Fig. 3.5)

他方、酸化速度の観点からは以下が言える。高速炉燃料の内面腐蝕は 20GWd/t に燃焼度しきい値をもつと言われており [7]、線出力 400W/cm の場合 20GWd/t に達する日数は 250 日程度となる。チタン箔の酸化は両面から進むため $50\mu\text{m} \cdot -349\text{kJ/mol} \cdot 700^\circ\text{C}$ の場合 100h 以内に全体が酸化する。したがって、酸素ポテンシャルや温度の低下の影響を受けるとしても、250 日に比べて十分に速いと考えられる。

3.5 まとめ

O/M 比 1.98 の MOX ペレットを充填した燃料要素内に装荷したチタンは、部分的に温度が 700°C を下回っても 650°C 以上であれば酸素吸収材として機能することを確認した。

4. チタンロールペレットの酸化特性評価

4.1 目的

本評価は以下を目的として実施した。

- ・ 想定する酸化条件下においてチタン箔の酸化が TiO_2 まで進むことの確認
- ・ チタン箔が完全に酸化した場合の膨張率や試料の形状安定性の評価
- ・ ロールペレットの酸化挙動評価（酸化による体積膨張、低スミア密度化による膨張の吸収の妥当性）

4.2 試験方法

試験に用いたチタンロールペレットは、2章の製作性評価結果に基づき、厚さ $50\mu\text{m}$ の箔を外径 8.63mm 、中心孔 2.3mm 、高さ 10mm のロールにしたものであり、内径 9.0mm の模擬被覆管に対してスミア密度が $50\%TD$ となるように箔の長さは 610mm とした。

酸化試験は、模擬被覆管に装荷してロールの膨張を制限した状態（拘束条件）とロール単独状態（自由膨張条件）の二種類について行った。（Table 4.1）

加熱は管状炉を用いて昇温速度 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ で 700°C まで昇温し 100h 保持した。加熱保持中の平均温度は 701.0°C であった。CO/CO₂ 混合ガスによって調整した酸素ポテンシャルは約 $-349\text{kJ}/\text{mol}$ であり、O/U 比 2.0011 に相当するものであった。

加熱後の金相試験では、それぞれの試料を樹脂埋めした後に上端面を研磨して横(断)面の観察を行い、次に縦割りにして縦断面の観察を行った。

4.3 結果

試験結果を以下に示す。

- ① 重量増加から評価した加熱後の試料の O/Ti 比は 2.05 であった。
- ② 金相観察の結果、箔には $100\sim 200\mu\text{m}$ 程度の間隔でクラックが生じていたが、ロールの原型は維持されており酸化に伴う崩壊等は生じなかった。（Fig.4.1）
- ③ 箔間のギャップは概ね閉塞していた。中心孔は残存しており、加熱前の 2.3mm （同条件で製作した別試料の測定値）に対し拘束条件では約 2.1mm 、自由膨張条件では約 1.9mm であった。（Fig.4.2）
- ④ 自由膨張条件の試料は、外側の数層が浮き上がった状態になったが、内側の層は試験前の位置に留まったままギャップのみが消失しており、ロール全体が膨張する傾向は見られなかった。（Fig.4.2）模擬被覆管近傍の箔-箔の密度がその他の部位に比べて高くなる傾向は見られなかった。（Fig.4.3）
- ⑤ チタンロールには高さ方向の伸びが見られた。（Fig.4.4）
- ⑥ 酸化後のチタン箔は二層になって剥離しており、金相組織に見られる顕著な間隙は加熱前の箔-箔の間隙ではなく剥離した二層間に生じたものであることがわかった。箔のクラックはチタン箔の表面に生じていた。（Fig.4.5, Fig.4.6）
- ⑦ SEM 及び BSE 像の酸化層は縞状を呈していた。

4.4 考察

- ① 700°C加熱時のチタン箔の最終酸化形態が TiO_2 であったことから、ゲッターチタン材がモル比 2 の酸素を吸収するものとして設計すればよいことがわかった。
- ② チタンロールペレットが、酸化時の相変化によって崩壊や粉末化することはなく、装荷位置に安定的に留まることがわかった。
- ③ ロールペレットが当初の位置において周辺の空隙を埋めるように膨張したことや、模擬被覆管近傍の箔-箔の密度がその他の部位に比べて高くなる傾向が見られなかったことから、ロール構造によって酸化時の体積膨張を吸収し被覆管への応力を抑制できることがわかった。
- ④ 本試験ではチタンロールの端部がフリーであったため、高さ方向の伸びが生じたが、燃料要素中では軸方向の伸びがプレナムスプリングによって制限されるため、その分径方向の膨張量が増す可能性があるが、酸化後の金相組織には中心孔やクラックによる空間の残存が見られることから、スミア密度を今回の 50%TD からさらに下げる必要はないと考えられる。
- ⑤ チタン箔が剥離した二層に分離する現象は、酸化による体積膨張により箔に反りが生じた結果一定間隔毎にクラックが形成されるとともに、酸化が箔の両側から均等に進むことにより中心部に歪が集中したためと推定される。Fig.4.6 に見られるクラックは縞紋の形成後に生じたことを示しており、箔表面からの酸化の進行とともに縞紋が形成され、その後歪の蓄積によりクラックが生じたことを示唆している。

4.5 まとめ

700°Cで加熱したチタン箔の最終酸化形態が TiO_2 であること、チタンロールが酸化しても物理的に安定であること、並びにロール構造にすることによってチタンの酸化時の体積膨張を吸収し被覆管への機械的応力を抑制できることを確認した。

5. ゲッター装荷量の推定

ロールペレットの酸化特性評価の結果から、燃料要素内に装荷すべきチタンの量が設計上要求される酸素吸収量の 0.5 モル比であること、及びロールペレットの密度を最大 50%TD まで引き下げれば被覆管への機械的応力を抑制できることがわかり、燃料要素 1 本あたりのチタン装荷量とそれに必要な容積を推定することが可能になった。

すなわち、高速炉実証炉の仕様では、燃料要素 1 本あたりの重金属量（炉心燃料 MOX）が 2.11 モル/本であるので、ペレットの初期 O/M 比を 1.98 と仮定する場合、ゲッター材チタンの装荷量は次のようになる。

燃料要素全体として O/M 比 1.95 相当の余剰酸素吸収能力を得ようとする場合は、O/M 比 1.98 のペレットの不足分をゲッターで補うことになるので、0.032mol (0.34cm³) のチタンを装荷すればよい。これは 50%TD のロールペレット 1 個に相当する。同様に O/M 比 1.90 相当の余剰酸素吸収能力を得る場合は 0.084mol (0.90cm³) の装荷となり、これはロールペレット 3 個に相当する。

実際には、実用炉燃料の余剰酸素吸収能力として O/M 比 1.90 相当は過大であり、1～2 個のロールペレットを装荷すれば十分と考えられるが、いずれにしても軸方向ブランケットの設計はフィッサイルインベントリや熱設計の観点から制約が大きく設計上の余裕のない炉心燃料領域に比べてフレキシブルに対応できることから、3 個以下のロールペレットの装荷スペースを確保することは十分に可能と考えられ、燃料設計との取り合いにおいてもロールペレット方式に実現性があると結論付けることができる。

6. まとめと今後の課題

以上の結果と前年度までの評価結果から、チタンロールペレット方式を用いた酸素ゲッターオプションが以下の諸要求を充足することを確認できた。

- ・ 製作加工性： 構造概念の実現性、部材の製作精度、燃料要素の加工性
- ・ 余剰酸素吸収の有効性： 想定温度・酸素ポテンシャル下における酸化特性
- ・ 燃料設計要求の充足性： 酸化時の物理的安定性、被覆材との機械的相互作用回避、被覆材・燃料との共存性、占有スペースの合理性

一方、未評価の事項として、MOX ペレットから酸素ゲッターまでの距離の問題が残されている。すなわち、被覆管内面腐蝕は、被覆管温度が最大になると同時に MOX ペレットから遊離する腐食性 FP に直接曝されることから炉心燃料領域上部で最も顕著になるが、そこでは被覆管内面とペレット表面はせいぜい数十 μm しか離れておらず、最大数十 cm 離れた位置の酸素ゲッターによって内面腐蝕を有効に防止できるかどうか確認が得られていない。(Fig.5.1)

しかし、このことは問題にならない可能性がある。それは照射中の温度が 1700°C 近くに達する MOX の酸素ポテンシャルがブランケット領域中のチタンよりも大幅に高いため(Fig.3.4)、照射開始後に MOX からチタンへの酸素移動が生じる可能性があることによる。(Fig.5.2) このことは MOX ペレットが還元されて低 O/M 化することを意味しており、低 O/M 比の燃料で内面腐蝕が抑制されることはよく知られている。

問題はこの場合の酸素の移動速度であるが、3 章で述べたように内面腐蝕が顕在化するのには照射開始後 250 日頃からであるので、それまでに MOX ペレットが低 O/M 化すればよいとすれば時間的な余裕はかなりあり、可能性は十分にあると考えられる。ペレットが低 O/M 化すれば余剰酸素のペレットからの遊離がなくなるので、酸素ゲッターまでの距離の問題は自ずと解消される。この場合のチタンの役割は、“余剰酸素の吸収”ではなく“MOX ペレットの還元”になるので、酸素ゲッターという言い方は馴染まなくなるかもしれない。

これらの点についての早期の評価が切望される。

7. 結 言

MOX ペレット型燃料に適用する酸素ゲッターオプションとしてチタンロールペレット方式を提案しその実現性検討を行った。その結果、製作加工性（構造概念の実現性、部材の製作精度、燃料要素の加工性）、余剰酸素吸収の有効性（想定温度・酸素ポテンシャル下における酸化特性）、燃料設計要求の充足性（酸化時の物理的安定性、被覆材との機械的相互作用回避、被覆材との共存性、占有スペースの合理性）を満足することを確認し、同方式の実現性見通しを得ることができた。

残された課題として、ゲッターの装荷位置が MOX ペレットから離れていることの評価が挙げられるが、これについては照射中の MOX からチタンへの酸素移動によるペレットの低 O/M 化の観点から検討すべきであると考えられる。

謝 辞

本研究における酸化挙動評価については、(株)東芝の坪井靖、永田章人両氏並びに日本核燃料開発(株)の水迫文樹、樫部信司両氏のご協力を、また、チタンロールペレットの製作性評価に際しては(株)昭和の新井照男氏他のご協力をいただきました。この場を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) O. Goetzman, P. Hofmann and F. Thuemmler, J. Nucl. Mater, 52, P.33 (1974).
- 2) JAEA-Research 2006-043: “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡ 技術検討書 - (2) 燃料サイクルシステム -”, (2006).
- 3) A. A. Mayorshin, O. V. Skiba, A. V. Bychkov, et. al, “RIAR Experience in the Field of Vibropac Fuel Use in Fast Reactors”, Proc.of GLOBAL 2005, Paper No.582, Tsukuba, Japan (2005).
- 4) JAEA-Research 2007-085: “高速炉 MOX 燃料用酸素ゲッターの開発－候補材の選定と被覆管装荷方法の検討－”, (2007)
- 5) JAEA-Research 2011-018: “高速炉 MOX 燃料用酸素ゲッターの開発(2)－装荷方法の検討、候補材の酸化挙動及び共存性評価－”, (2011)
- 6) エネ・ア・トロポフ他, “金属酸化物の状態図”, 日・ソ通信社, (1972)
- 7) PNC TN241 83-16: “FCCI 関連研究のまとめ (57年度まで)”, (1983)

Table 3.1 チタン材の酸化特性評価の条件

酸素ポテンシャル; ΔG_{O_2}		温度 (°C)	加熱時間 (h)
設定基準	実績値(kJ/mol)		
O/U 比 2.00 平衡相当	-349	700	10, 50, 100, 200
	-349	650	200
	-386	580	200
O/M 比 < 2.00 相当	-542	750	200
	-499	700	200

* イタリック表示は前回までに実施した条件を示す。

Table 3.2 チタン試料の重量増加率

温度 (°C)	平均温度 (°C)	ΔG_{O_2} (kJ/mol)	酸素分圧 (atm)	加熱時間 (h)	重量増加率		TiO _x 層厚さ (μ m)
					(%)	(mg/mm ²)	
700	703	-349	$2.36 \cdot 10^{-19}$	50	1.38	0.047	50
				200	7.45	0.252	209
		-499		200	1.30	0.044	<1
750	752	-542	$2.12 \cdot 10^{-28}$	200	1.60	0.052	<2

Table 4.1 チタンロールペレットの酸化特性評価の条件

酸素ポテンシャル; ΔG_{O_2}		温度 (°C)	加熱時間 (h)	試料の装荷状態
設定基準	実績値(kJ/mol)			
O/U 比 2.00 平衡相当	-349	700	100	単独状態
				模擬被覆管装荷

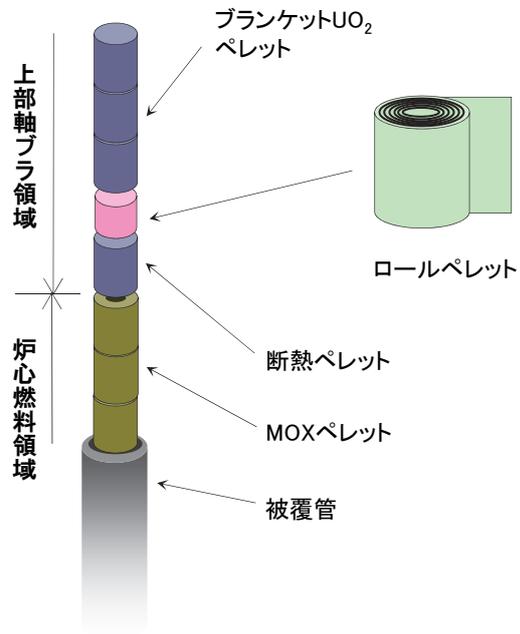
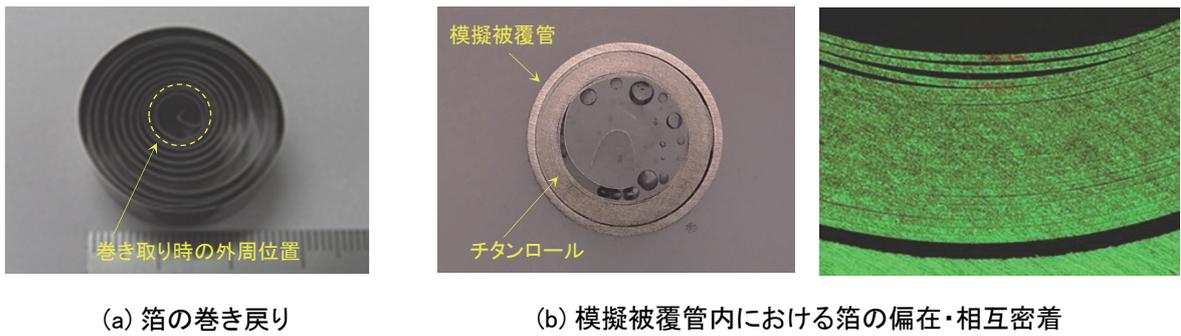


Fig. 2.1 チタンロールペレット方式の概念図



(a) 箔の巻き戻り

(b) 模擬被覆管内における箔の偏在・相互密着

Fig. 2.2 チタンロールペレット製造上の課題

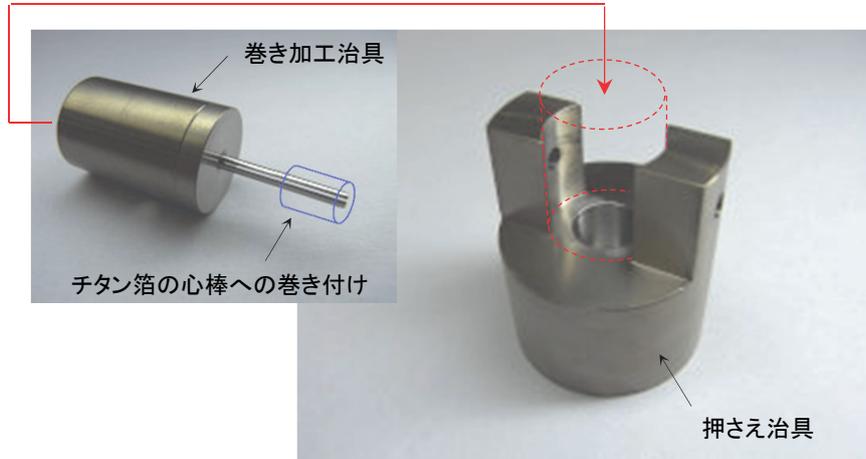
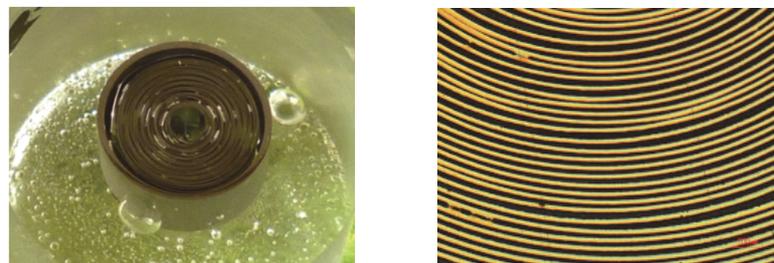
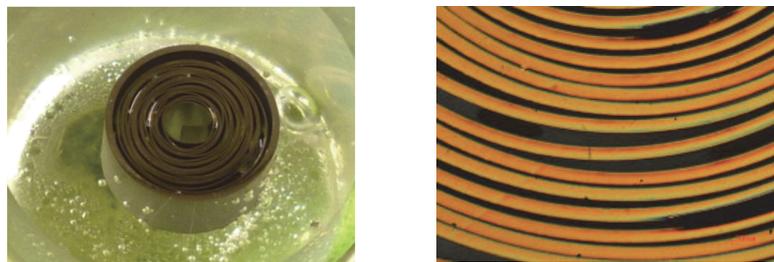


Fig. 2.3 ロール加工治具の外観及びセット状態



(a) 箔厚50 μm (10mmW × 610mmL)



(b) 箔厚100 μm (10mmW × 305mmL)

Fig. 2.4 チタンロールペレットの製作試験結果

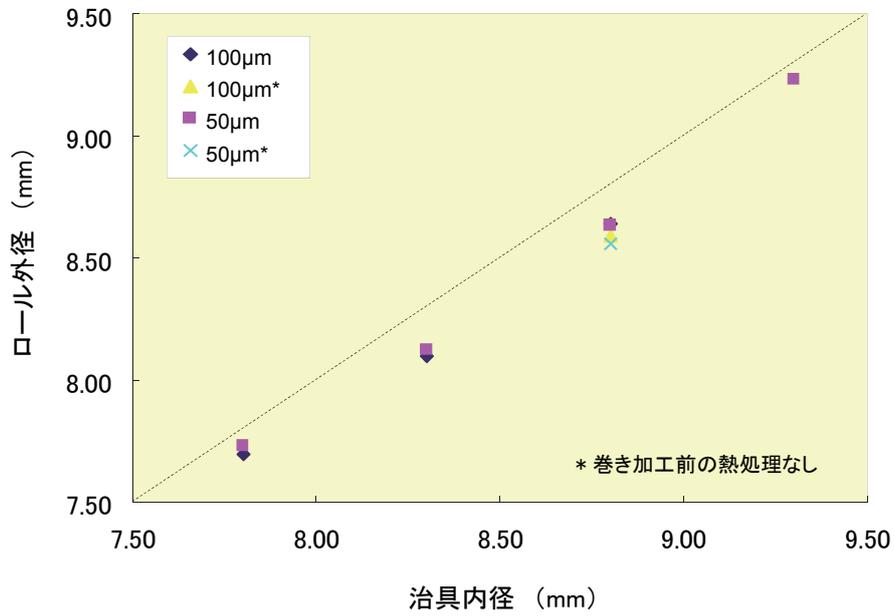


Fig. 2.5 治具内径とロール外径の相関

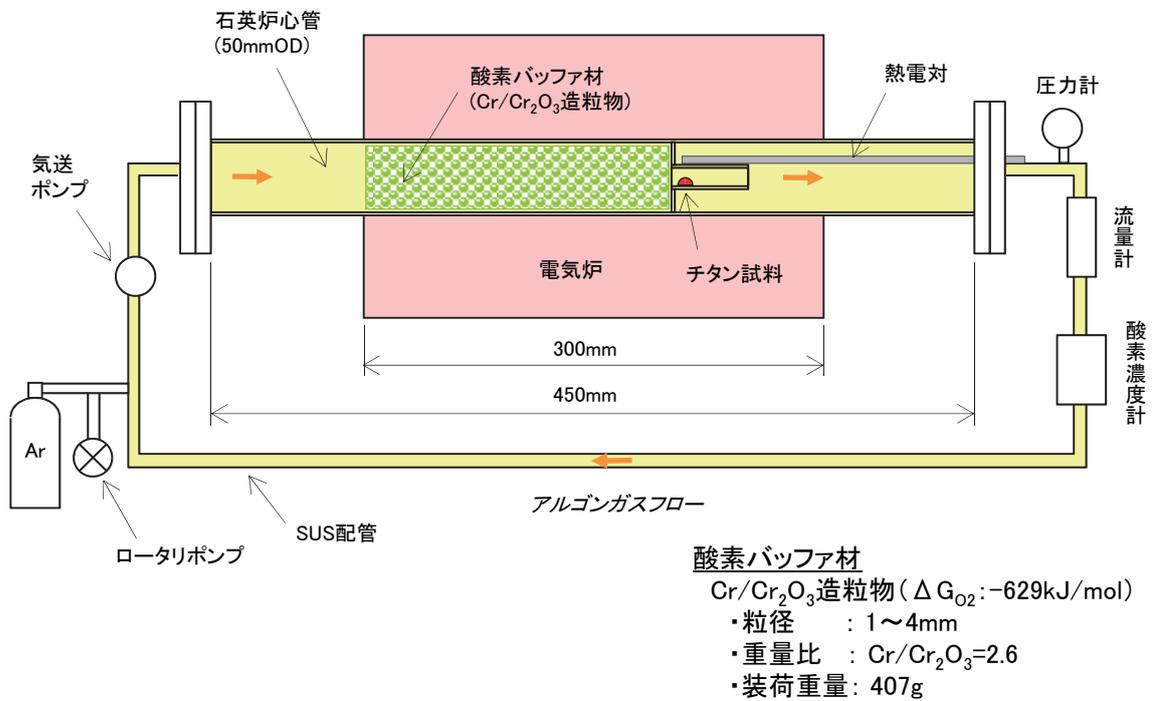


Fig. 3.1 低酸素ポテンシャル酸化試験の装置概略図

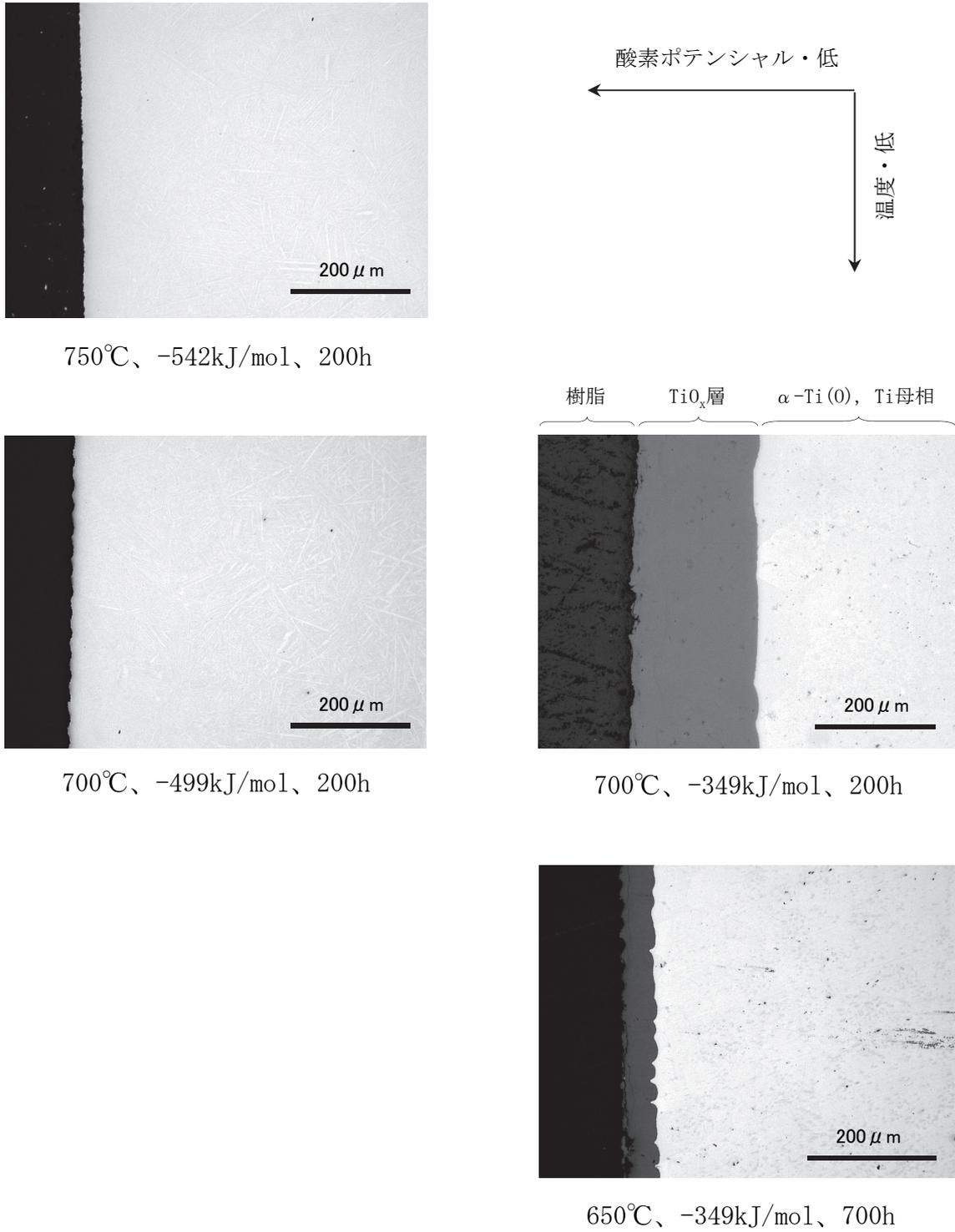


Fig. 3.2 チタンディスク表面酸化層の断面金相

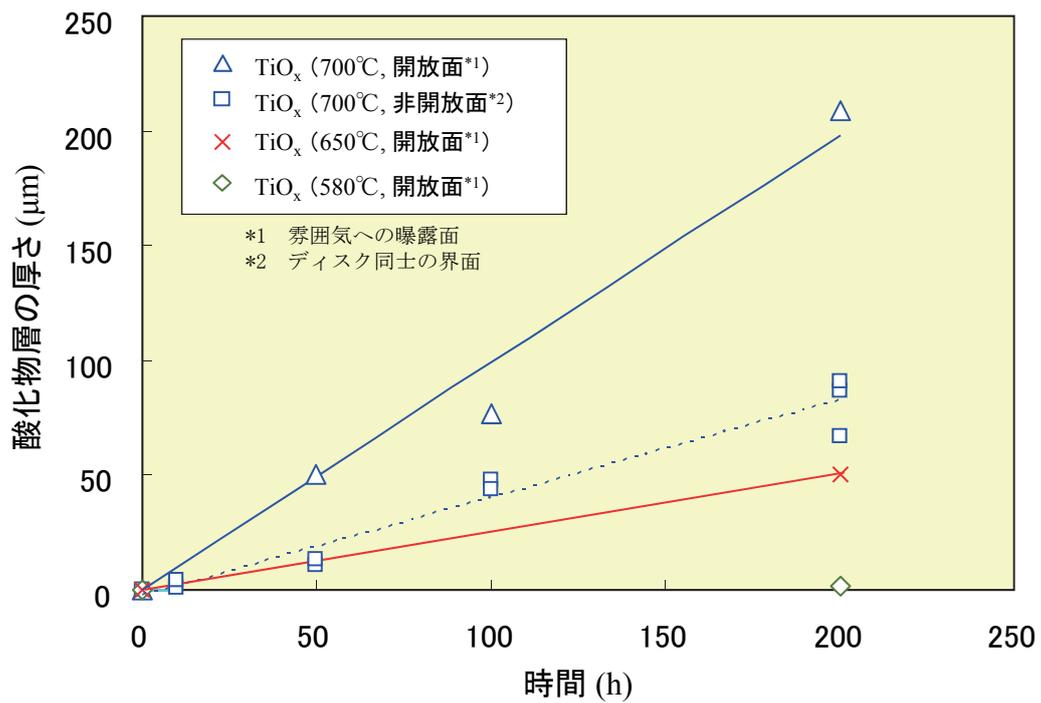


Fig. 3.3 チタン酸化層の厚さの温度、 ΔG_{O_2} 依存性

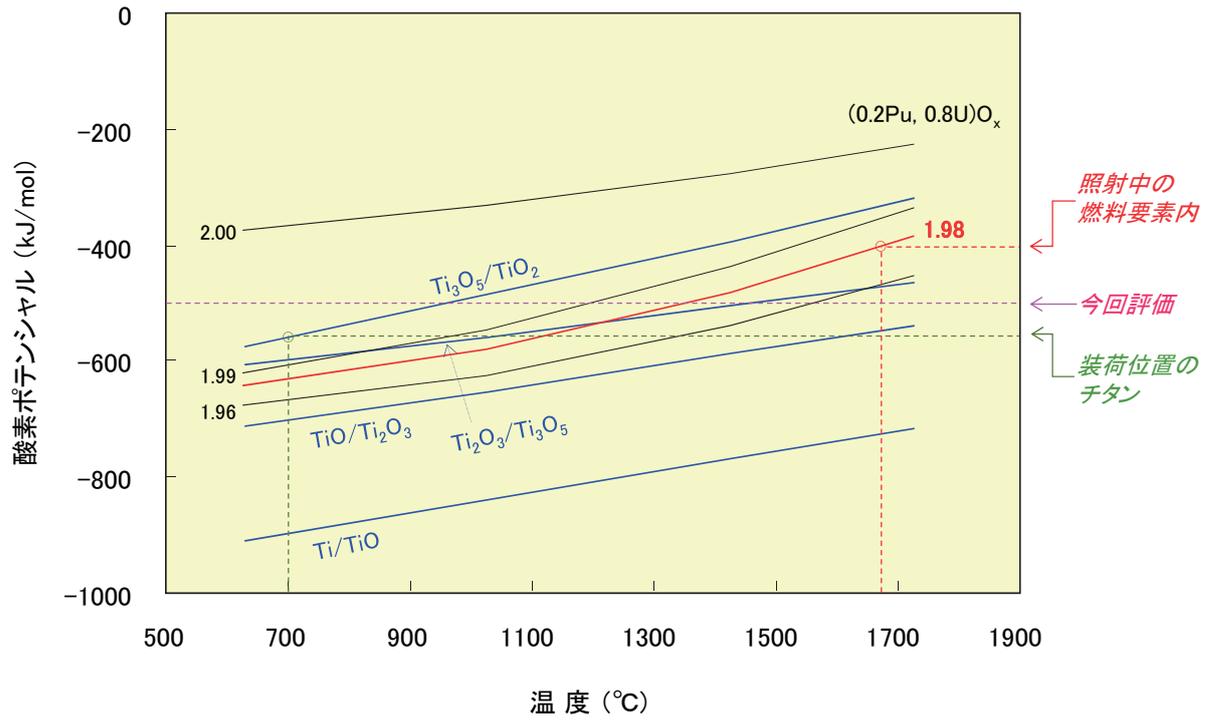
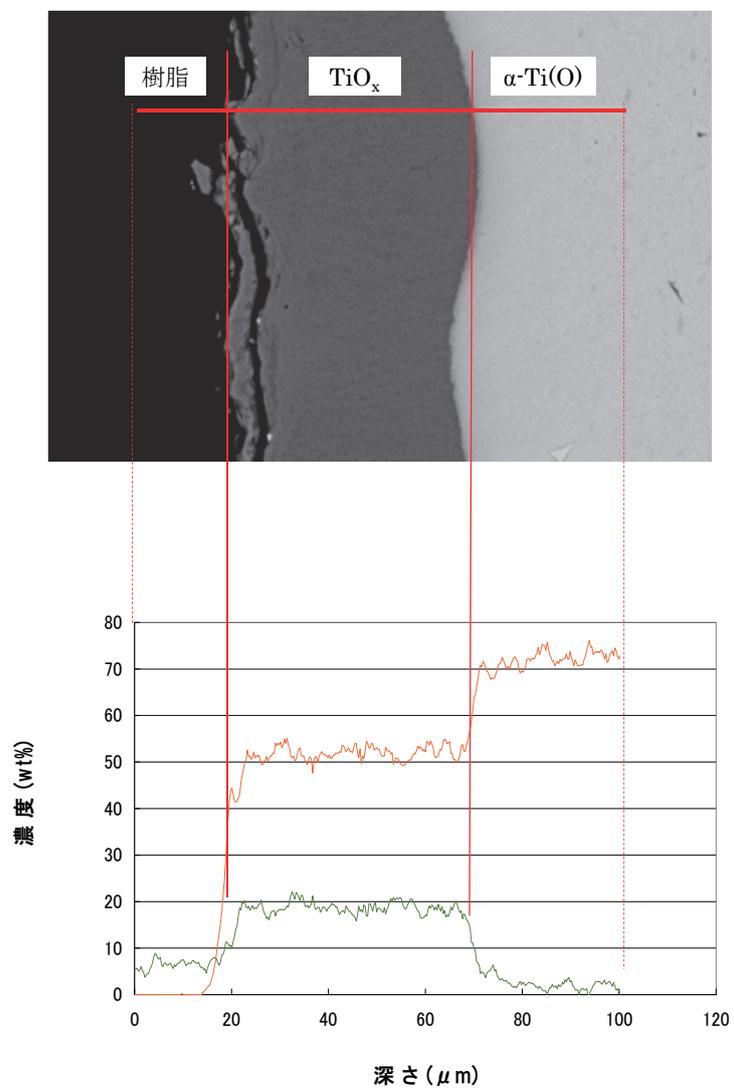


Fig. 3.4 MOX・チタンの酸素ポテンシャルの比較



※ -349kJ/mol・700°C×50h

Fig. 3.5 チタンディスク表面酸化層のSEM/EDX結果(-349kJ/mol×50h)

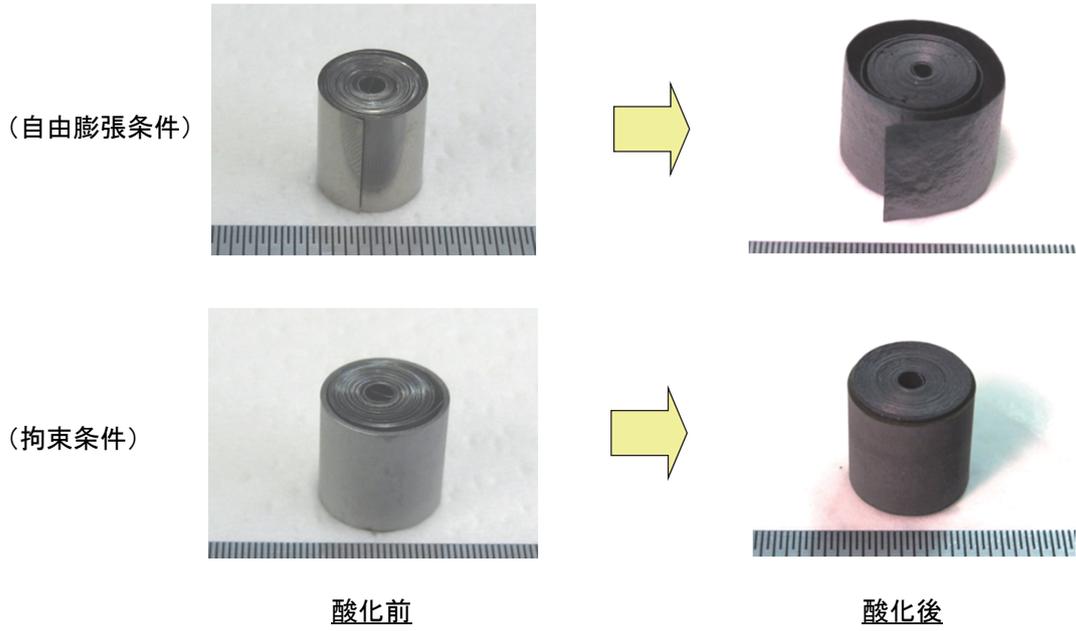


Fig. 4.1 酸化前後の外観比較

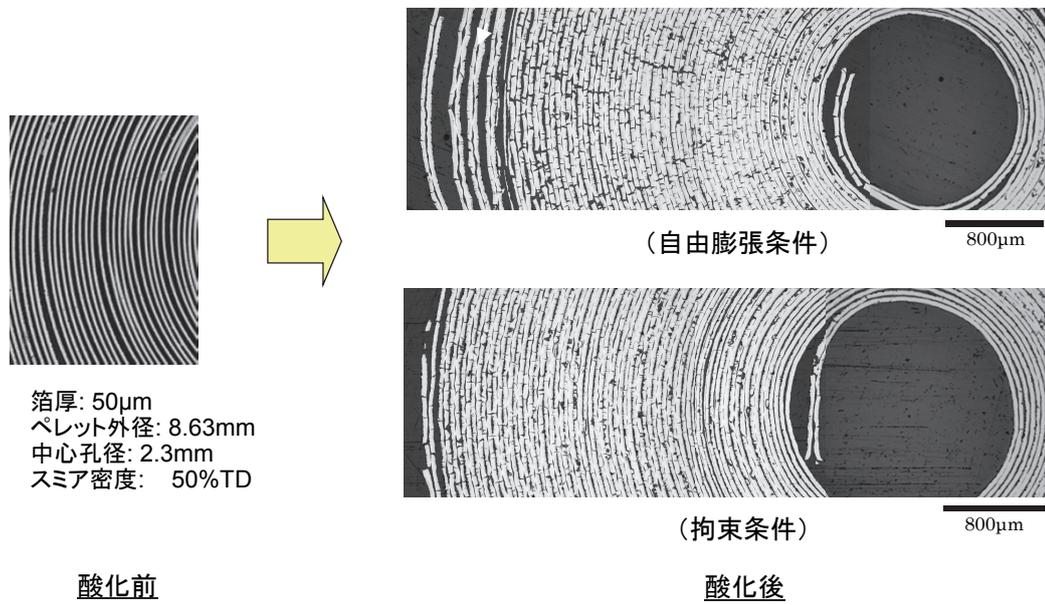


Fig. 4.2 酸化前後の断面金相比較

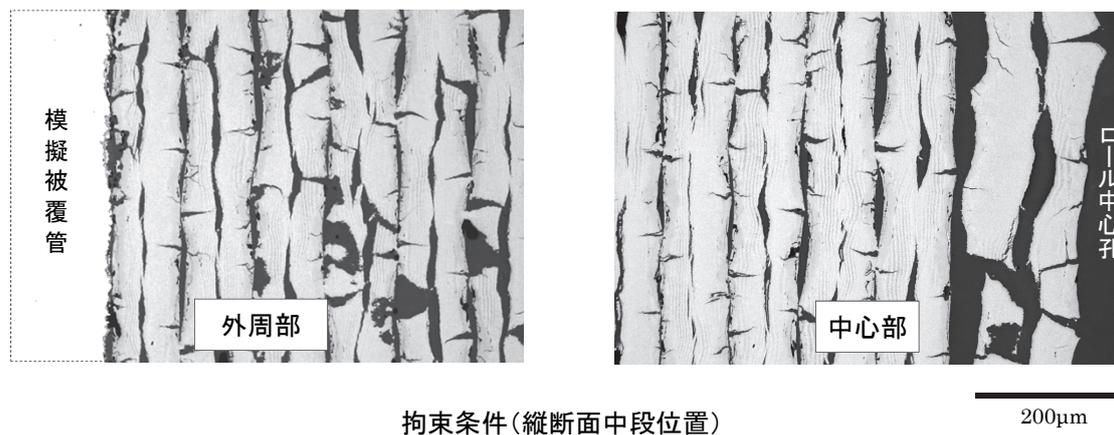


Fig. 4.3 外周部と中心部の断面組織比較

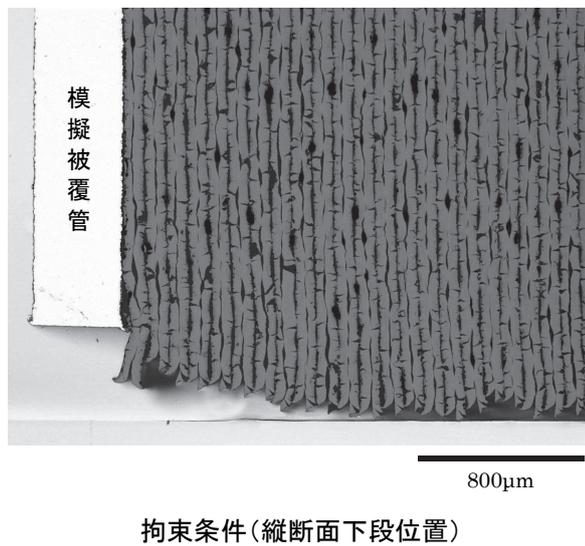


Fig. 4.4 ロールペレット高さ方向の伸び状態

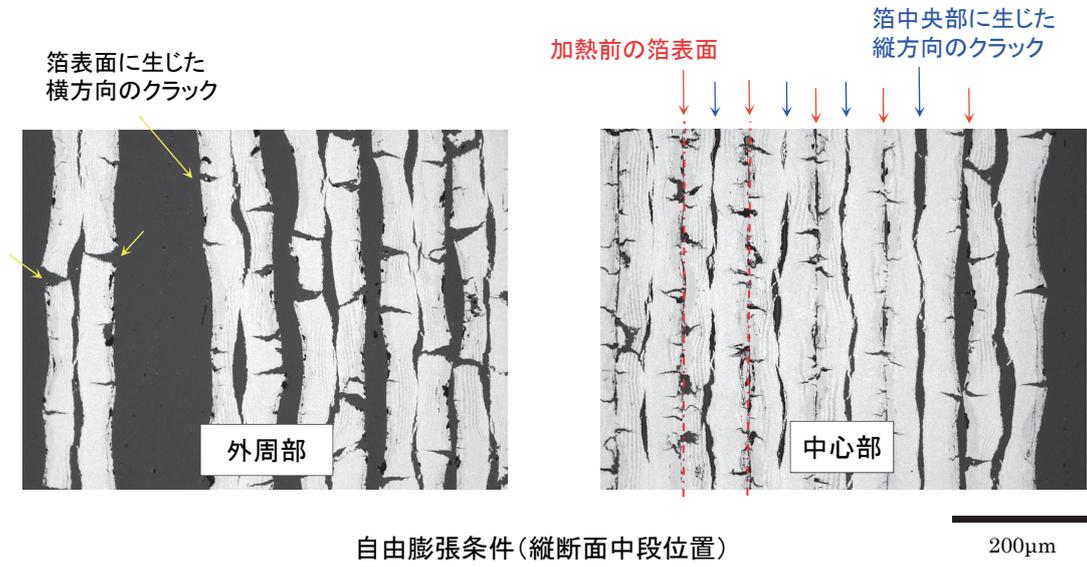


Fig. 4.5 クラックの詳細状態

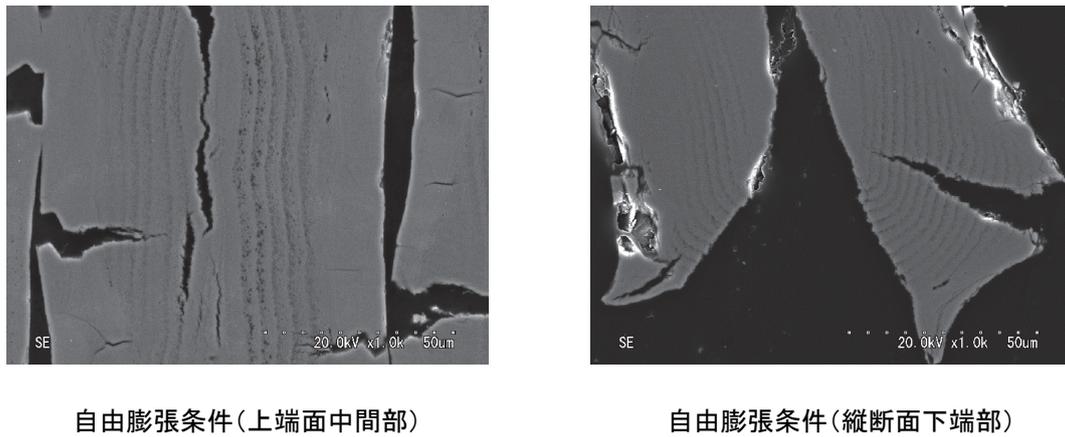


Fig. 4.6 クラックの形成状態

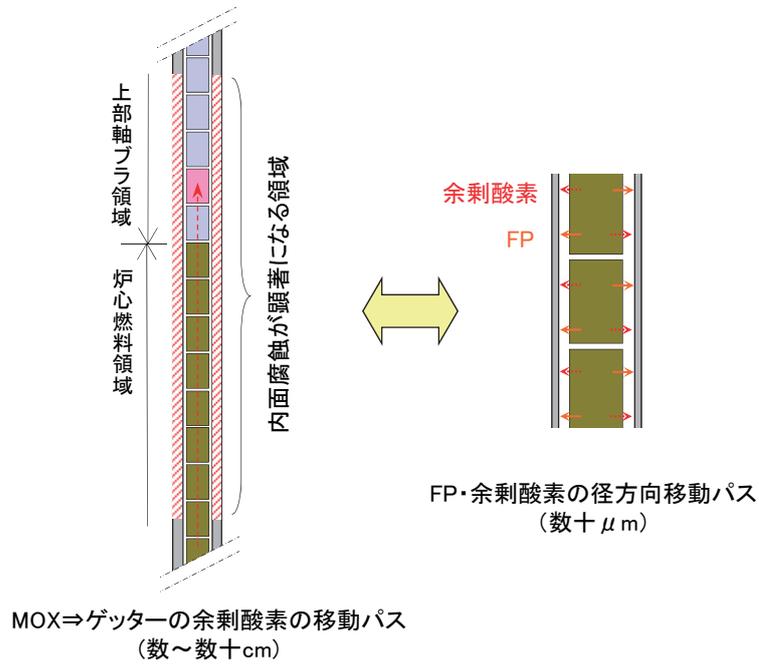


Fig. 5.1 ゲッターとMOXの位置関係の影響

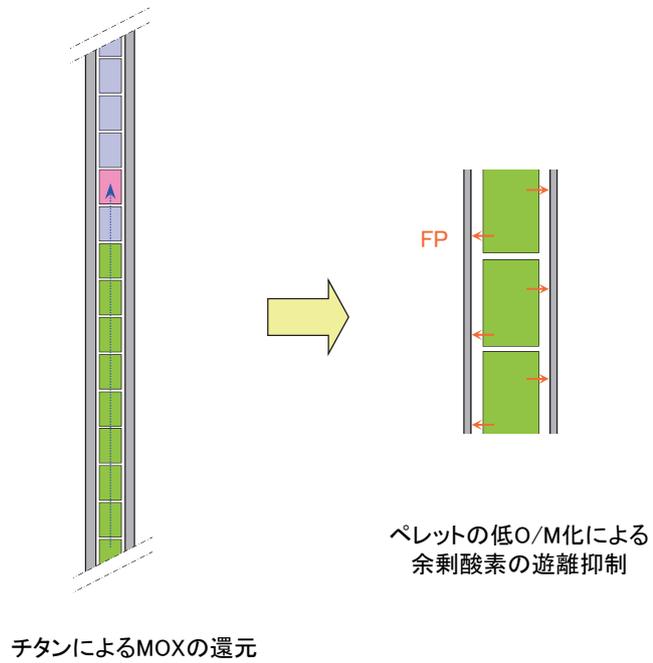


Fig. 5.2 MOXからゲッターへの酸素移動によるペレットの低O/M化

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

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

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

