

一般セッション | V. 核燃料サイクルと材料：501-2 核燃料とその照射挙動

2024年9月13日(金) 14:45 ~ 16:10 N会場(講義棟B棟2F B203)

**[3N10-14] MOX燃料製造技術**

座長:中森 文博(電中研)

14:45 ~ 15:00

[3N10]

## 乾式回収粉の粒度調整技術開発

(10) 粉体衝突に対する耐摩耗性評価

\*瀬川 智臣<sup>1</sup>、高島 颯人<sup>1</sup>、山本 和也<sup>1</sup>、小野 高德<sup>1</sup>、川口 浩一<sup>1</sup>、石井 克典<sup>1</sup> (1. JAEA)

15:00 ~ 15:15

[3N11]

## 乾式回収粉の粒度調整技術開発

(11) 気流式分級機の方級特性

\*川口 浩一<sup>1</sup>、瀬川 智臣<sup>1</sup>、石井 克典<sup>1</sup>、高島 颯人<sup>1</sup>、山本 和也<sup>1</sup>、小野 高德<sup>1</sup> (1. JAEA)

15:15 ~ 15:30

[3N12]

## 乾式回収粉末を用いたMOXペレット製造技術

(1)造粒条件の最適化

\*後藤 健太<sup>1</sup>、高藤 清人<sup>1</sup>、小野 高德<sup>1</sup>、市毛 秀和<sup>1</sup>、畑中 延浩<sup>1</sup>、村上 龍敏<sup>1</sup> (1. JAEA)

15:30 ~ 15:45

[3N13]

## 乾式回収粉末を用いたMOXペレット製造技術

(2)粉末粒度とペレット密度への影響

\*高藤 清人<sup>1</sup>、後藤 健太<sup>1</sup>、山本 和也<sup>1</sup>、市毛 秀和<sup>1</sup>、畑中 延浩<sup>1</sup>、村上 龍敏<sup>1</sup> (1. JAEA)

15:45 ~ 16:00

[3N14]

## マイクロ波加熱脱硝粉末及び乾式回収MOX粉末の焼結挙動

\*廣岡 瞬<sup>1</sup>、林崎 康平<sup>1</sup>、大和田 英明<sup>2</sup>、砂押 剛雄<sup>2</sup>、田村 哲也<sup>2</sup>、齋藤 浩介<sup>1</sup> (1. JAEA、2. 検査開発)

16:00 ~ 16:10

座長持ち時間

## 乾式回収粉の粒度調整技術開発 (10) 粉体衝突に対する耐摩耗性評価

Technological development of the particle size adjustment of recycle powder

(10) Evaluation of erosion resistance against powder impact

\*瀬川 智臣<sup>1</sup>, 高島 颯人<sup>1</sup>, 山本 和也<sup>1</sup>, 小野 高德<sup>1</sup>, 川口 浩一<sup>1</sup>, 石井 克典<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構

本研究では、粉砕処理時の粉体衝突に対する材料の耐摩耗性評価を目的とし、脆性材料および展性材料を用いて、粉体衝突状態を模擬し、アルミナ粉体の噴射量と衝突角度が摩耗量に及ぼす影響を確認した。

**キーワード**：乾式リサイクル、粉体衝突、耐摩耗性、脆性材料、展性材料

### 1. 緒言

原子力機構では、規格外 MOX 燃料ペレットを粉砕した乾回粉を原料として再利用する乾式リサイクル技術開発の一環として、乾式リサイクル設備の設計検討を進めている[1]。当該設備においては、高い安全性および耐久性が求められるため、粉砕処理時の粉体衝突に対する材料の耐摩耗性が重要となる。材料の耐摩耗性に関して、脆性材料においては脆性破壊、展性材料においては切削作用による摩耗が大きく影響する。

本研究では、粉砕処理時の粉体衝突状態を模擬し、脆性材料および展性材料の試験片へアルミナ粉体を噴射し衝突させた際の噴射量と衝突角度をパラメータとした試験を実施し、試験片の摩耗量の評価を行った。

### 2. 試験方法

脆性材料として、アルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、窒化ケイ素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )、炭化ケイ素( $\text{SiC}$ )、炭化タングステン-コバルト( $\text{WC-Co}$ )、展性材料として、ステンレス鋼( $\text{SUS304}$ )を使用した。各材料の試験片に対して、不定形状のアルミナ粒子を衝突速度約 70 m/s、衝突角度  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  で噴射し、所定の累積噴射量に達する毎に試験片の質量測定を行った。

### 3. 試験結果および考察

異なる材料における衝突角度依存性を比較するため、初期状態から累積噴射量 1.0 kg までの噴射量当たりの摩耗体積を評価した結果を図 1(a)に示す。摩耗体積は、試験片の質量変化から算出した。

さらに、粒子の運動エネルギー  $E$  を次式により、法線方向と接線方向の 2 成分に分離した。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv^2\sin^2\theta + \frac{1}{2}mv^2\cos^2\theta \quad (1)$$

ここで、 $m$ は粒子質量、 $v$ は粒子速度、 $\theta$ は噴射角度である。法線方向の成分が脆性破壊、接線方向の成分が切削作用に寄与するものと考えられる。法線方向の成分による摩耗は、噴射角度  $90^\circ$  における摩耗  $\Delta V_{90^\circ}$  を基準に、 $\sin^2\theta$  に比例するものとして推定した。評価結果を図 1(b)に示す。また、全摩耗量から法線方向の成分による摩耗を差し引いたものを、接線方向の成分による摩耗とした。評価結果を Fig. 1(c)に示す。

脆性材料の場合、噴射角度  $90^\circ$  未満における摩耗量は、接線方向の成分には依存せず、材料毎に概ね一定となる傾向を示した。一方、展性材料の  $\text{SUS304}$  の場合、摩耗量は、接線方向の成分の増加に伴い増大し (図 1(c))、既存知見[2]と整合する結果を得た。

乾式リサイクル設備の設計検討を行う上で、噴射量と衝突角度を考慮し適切な耐摩耗性の材料を選定することが重要と考えられる。

### 4. 結論

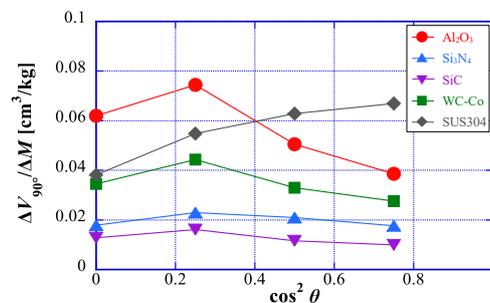
粉体衝突に対する脆性材料および展性材料の耐摩耗性評価を実施し、粉体噴射量と衝突角度が材料の摩耗量に及ぼす影響を確認した。得られた評価結果を今後の乾式リサイクル設備の設計検討に反映する。

#### 参考文献

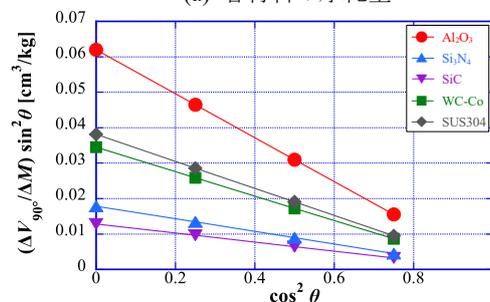
[1] 山本 和也, 他, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 1109 (2022). [2] A. Suman, et al., Acta Astronautica, 214 (2024) 380–388.

\*Tomoomi Segawa<sup>1</sup>, Hayato Takashima<sup>1</sup>, Kazuya Yamamoto<sup>1</sup>, Takanori Ono<sup>1</sup>, Koichi Kawaguchi<sup>1</sup> and Katsunori Ishii<sup>1</sup>,

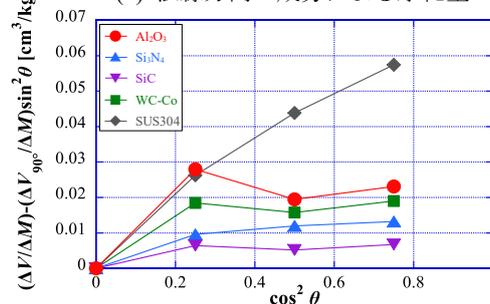
<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency



(a) 各材料の摩耗量



(b) 法線方向の成分による摩耗量



(c) 接線方向の成分による摩耗量

図 1 摩耗量の衝突角度依存性

## 乾式回収粉の粒度調整技術開発 (11) 気流式分級機の分級特性

Technological development of the particle size adjustment of recycle powder

(11) Classifying property of pneumatic classifier

\*川口 浩一<sup>1</sup>, 瀬川 智臣<sup>1</sup>, 石井 克典<sup>1</sup>, 高島 颯人<sup>1</sup>, 山本 和也<sup>1</sup>, 小野 高徳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構

乾式リサイクルのための微粉碎プロセスにおける粒度調整のための気流式分級機について、粉末供給速度が部分分離効率に及ぼす影響を評価した。部分分離効率に対してシグモイド曲線をフィッティングして得たパラメータは、供給速度に対して一次関数的な変化を示した。

**キーワード:** 乾式リサイクル, 粒度調整, 気流式分級機, 分級点, 部分分離効率

### 1. 緒言

原子力機構では、MOX 燃料製造で発生する燃料スクラップを微粉碎して原料粉末として再利用する乾式リサイクル技術の開発を進めている。乾式リサイクルにより回収される粉末の粒子径は、ペレットの焼結性に影響する重要な特性である。回収粉末の粒子径調整に使用する気流式分級機について、粉末供給速度が分級特性に及ぼす影響を評価した。

### 2. 試験方法

粒子径 1~500 μm にわたって連続した分布を持つことを目標に調製した酸化鉄粉末および珪砂粉末を模擬粉末とした。粒子径 10 μm 付近で分級されるように分級機を設定し、供給速度 0.25~50 kg/h で粉末を供給して分級した。得られた細粉および粗粉それぞれの収量および粒子径分布を測定し、次式により粒子径区間毎の部分分離効率  $F(i)$  を算出した。

$$F_{f(i)} = \frac{M_f Y_{f(i)}}{M_f Y_{f(i)} + M_c Y_{c(i)}} \quad (1)$$

$$F_{c(i)} = \frac{M_c Y_{c(i)}}{M_f Y_{f(i)} + M_c Y_{c(i)}} \quad (2)$$

ここで、 $i$  は粒子径分布測定の区間に割り当てた番号、 $M$  は収量、 $Y(i)$  は区間  $i$  における粒子径分布密度である。また、添え字の  $f$  および  $c$  はそれぞれ細粉および粗粉を表す。

### 3. 結果と考察

得られた分級粉のうち、細粉の割合は 0.5~2%であった。細粉の粒子径範囲は、最小粒子径 8~9 μm, 最大粒子径 10~60 μm であり、およそ 10 μm で細粉側と粗粉側の収量が逆転した。供給粉中および粗粉中では検出下限濃度未満となった区間を含む領域で分級が行われた結果、(2)式によって算出した部分分離効率曲線は、図 1 に実線で示すように左右非対称となった。粗粉の部分分離効率が 0.5~0.6 以上の部分を用いて、次に示すシグモイドによるフィッティングを行った。

$$F_{c(D)} = \frac{1}{1 + e^{-a \log(D/D_c)}} \quad (3)$$

ここで、粒子径  $D$  は区間の上下限粒子径の幾何平均を用いた。求まるパラメータ  $D_c$  は分級点、 $a$  は分級の鋭さに関係する。フィッティングによる計算値を図 1 にシンボルで示す。図 2 に示すように、 $D_c$  は供給速度に対して一次関数的な増加傾向を示した。 $a$  についてはその逆数  $1/a$  が一次関数的な増加傾向を示した。

### 4. 結論

気流式分級粉を用いた試験により収量および粒子径分布を測定し、粉末供給速度が分級特性に及ぼす影響を評価した。本結果は、乾式リサイクル設備の工程予測への適用が期待できる。

\*Koichi Kawaguchi<sup>1</sup>, Tomoomi Segawa<sup>1</sup>, Katsunori Ishii<sup>1</sup>, Hayato Takashima<sup>1</sup>, Kazuya Yamamoto<sup>1</sup> and Takanori Ono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency

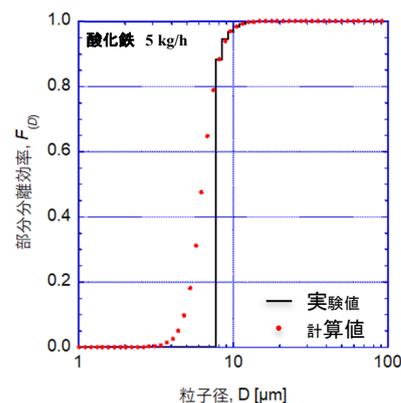


図 1 部分分離効率

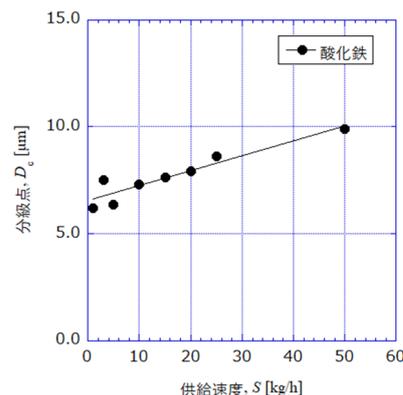


図 2  $D_c$  の供給速度依存性

# 乾式回収粉末を用いた MOX ペレット製造技術

## (1) 造粒条件の最適化

MOX pellet manufacturing technology using recycle powder

(1) Optimization of granulation conditions

\*後藤 健太<sup>1</sup>, 高藤 清人<sup>1</sup>, 小野 高德<sup>1</sup>, 市毛 秀和<sup>1</sup>, 畑中 延浩<sup>1</sup>, 村上 龍敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構

プルトニウム燃料技術開発センターでは、核燃料物質の集約化作業の一環として、これまでの製造試験で発生した乾式回収粉末（焼結ペレット等を粉砕したリサイクル粉末）を保管体（過去の燃料製造の残部材を用いて集合体形状としたもの）として安定保管する取り組みを進めている。これまで、乾式回収粉末を主要な原料として MOX ペレットを製造した実績はなく、本取り組みを通じて得られた知見について報告する。

**キーワード**：MOX ペレット，造粒，乾式回収粉末

### 1. 背景

高速炉の MOX ペレットは外径が小さいため、成型工程の前処理として、MOX 粉末の造粒処理を行う。造粒処理とは、図 1 に示す通り、MOX 粉末をロータリープレスによりタブレットと呼ばれる円盤状の形に成型した後、これを解砕して顆粒状とすることで粉末の流動性を向上させる処理である。しかし、乾式回収粉末は流動性や成型性が悪いため、良質なタブレットを作ることが難しく、流動性の高い顆粒を作ること課題があった。

### 2. 検討内容及び結果

造粒処理の不具合を分析した結果、タブレット成型時に成型ダイスへ粉末が安定して充填できていないことが主な要因の一つとして挙げられた。タブレットの硬度を簡易な硬度計により測定したところ、タブレットの硬度にばらつきが生じていることが分かった。これは、タブレット成型時に、成型ダイスへの粉末充填量が安定せず、タブレットの成型圧力にばらつきが生じたことによるものと考えられた。このため、造粒処理を 2 段階で行うこととし、一段階目で流動性を高めた粉末を、再度、造粒処理にかけることでタブレットの成型圧力のばらつきの低減を図った。この結果、図 2 に示す通り、タブレットの成型圧力が安定し、良質なタブレットが安定して得られるようになった。これにより、流動性の高い顆粒をペレット成型ダイスへ供給し、安定したペレット成型処理を行うことが可能となった。

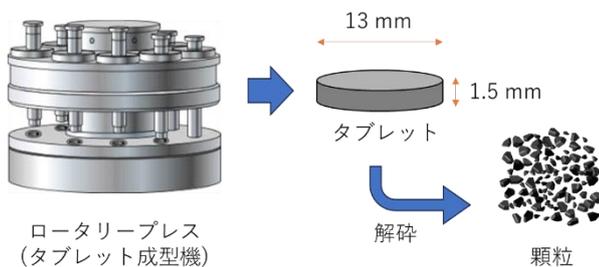


図 1 造粒処理の概要図

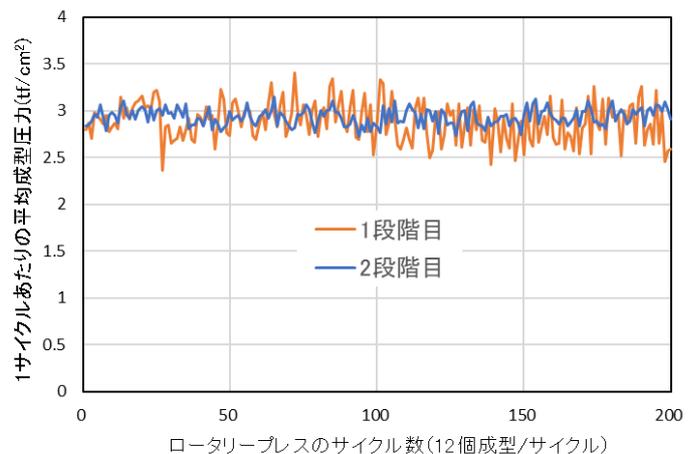


図 2 ロータリープレスにおけるタブレット成型圧力のトレンドグラフ

\* Kenta Goto<sup>1</sup>, Kiyoto Takato<sup>1</sup>, Takanori Ono<sup>1</sup>, Hidekazu Ichige<sup>1</sup>, Nobuhiro Hatanaka<sup>1</sup> and Tatsutoshi Murakami<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency

## 乾式回収粉末を用いた MOX ペレット製造技術

### (2) 粉末粒度とペレット密度への影響

MOX pellet manufacturing technology using recycle powder

(2) Effect of powder particle size on pellet density

\*高藤 清人<sup>1</sup>, 後藤 健太<sup>1</sup>, 山本 和也<sup>1</sup>, 市毛 秀和<sup>1</sup>, 畑中 延浩<sup>1</sup>, 村上 龍敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構

プルトニウム燃料技術開発センターでは、核燃料物質の集約化作業の一環として、これまでの製造試験で発生した乾式回収粉末を保管体（過去の燃料製造の残部材を用いて集合体形状としたもの）として安定保管する取り組みを進めている。これまで、乾式回収粉末を主要な原料として MOX ペレットを製造した実績はなく、本取り組みを通じて得られた知見について報告する。

**キーワード**：MOX ペレット，ペレット密度，乾式回収粉末

#### 1. 背景

乾式回収粉末は、粉末の粒度分布の違いが MOX ペレットの焼結性に影響を及ぼすことが報告されている[1]。様々な粒度分布の乾式回収粉末を原料とする保管体化では、当初、得られた MOX ペレットの焼結密度や外径が安定しないという課題があった。このため、MOX ペレットの品質の安定化を図るため、粉末粒度と焼結密度との関係性を評価した。

#### 2. 結果

図 1 に乾式回収粉末の平均粒径と MOX ペレットの焼結密度の理論密度比の関係を示す。全体として、平均粒径が大きいと MOX ペレットの密度が低くなる傾向が見られた。しかし、平均粒径が 3 $\mu\text{m}$  を下回る場合でも、焼結ペレットの密度が低下する場合がみられた。これらの粉末の粒度分布を確認したところ、10 $\mu\text{m}$  以上の比較的粗い粒子が含まれていることを確認した。粗い粒子が含まれると焼結時の収縮性の違いによりペレット内に空孔が生じ、その結果、焼結密度が低下したものと推定した。

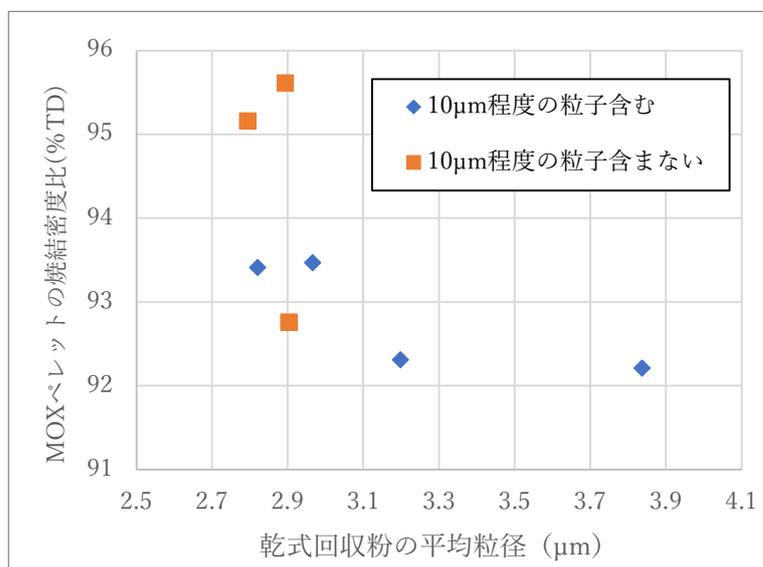


図 1 乾式回収粉の平均粒径と MOX ペレットの焼結密度比

#### 参考文献

[1] 林崎康平, 他, 日本原子力学会 2023 春の年会 2F14,2023

\*Kiyoto Takato<sup>1</sup>, Kenta Goto<sup>1</sup>, Kazuya Yamamoto<sup>1</sup>, Hidekazu Ichige<sup>1</sup>, Nobuhiro Hatanaka<sup>1</sup> and Tatsutoshi Murakami<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency

# マイクロ波加熱脱硝粉末及び乾式回収 MOX 粉末の焼結挙動

Sintering behavior of microwave de-nitrated or dry-recycled MOX powders

\*廣岡 瞬<sup>1</sup>, 林崎 康平<sup>1</sup>, 大和田 英明<sup>2</sup>, 砂押 剛雄<sup>2</sup>, 田村 哲也<sup>2</sup>, 齋藤 浩介<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>検査開発

マイクロ波加熱脱硝 MOX 粉末は平均粒径がサブミクロンと微粉であるのに対して、乾式回収 MOX 粉末は、粒度の調整条件によっては  $10\ \mu\text{m}$  以上の粒子を多く含む粗い粉末となる。これらの粉末について、熱膨張計及び DSC による焼結試験、並びにペレットの SEM 観察を行い、緻密化の挙動を比較評価した。

**キーワード:** MOX, 焼結, 熱膨張計, DSC, SEM

## 1. 緒言

高速炉用 MOX 燃料の製造に用いられるマイクロ波加熱脱硝 MOX 粉末 (MH 粉) や乾式回収 MOX 粉末 (乾回粉) の焼結挙動を理解するために、これまでに熱膨張計を用いた焼結試験を行い、乾回粉は MH 粉に対して比較的高温で焼結が進み、焼結後は比較的低い密度が得られるデータを得た。本研究ではこれらの焼結挙動についてさらに詳しく調べるため、DSC を用いた焼結試験と、焼結過程の SEM 観察を行った。

## 2. 試験方法

焼結試験に供したそれぞれの粉末のグリーンペレットの作製は、ダイス径 3 mm、成型圧 400 MPa、保持時間 30 秒の条件とした。DSC による焼結は昇温速度  $8^\circ\text{C}/\text{min}$ 、最高温度  $1450^\circ\text{C}$  で実施した。焼結過程の SEM 観察については、各温度で昇温を停止し、ペレットの破断面を観察した。

## 3. 結果と考察

図 1 に過去に取得した収縮データ (Shrinkage) と今回取得した DSC データ (Heat flow) を示す。DSC データの正のピークは焼結に伴う発熱を意味する。いずれの粉末においても、DSC で得られるピークは収縮が始まる温度 (MH 粉:  $900\sim 1000^\circ\text{C}$ 、乾回粉:  $1400\sim 1500^\circ\text{C}$ ) より低い温度で確認された。これは、初期段階の収縮を伴わないネック成長に関連すると考えられる。また、このピークは微粉の MH 粉で顕著であった。

図 2 に示す SEM 像では、いずれの粉末においても  $1300^\circ\text{C}$  付近から粉末形状の変化が確認された。 $1600^\circ\text{C}$  では明確なネッキングや粒成長の様子が見られ、乾回粉においては大きな隙間が生じている様子も確認された。これは成型体における粗大な粒子同士の接触性の低さのためであり、低密度化の原因になっていると考えられる。

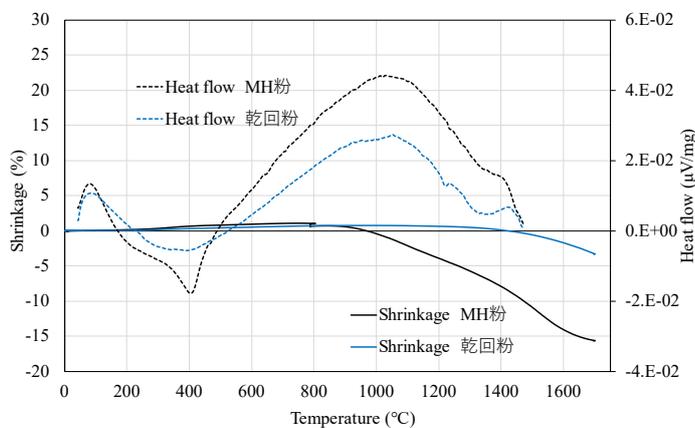


図 1 焼結における収縮データと DSC データ

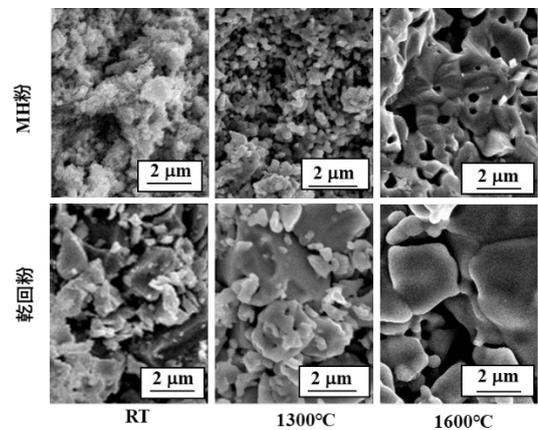


図 2 焼結過程の破断面の SEM

\*Shun Hirooka<sup>1</sup>, Kohei Hayashizaki<sup>1</sup>, Hideaki Ohwada<sup>2</sup>, Takeo Sunaoshi<sup>2</sup>, Tetsuya Tamura<sup>2</sup>, Kosuke Saito<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>Inspection Development Company