

## 水中造粒機ダイス用の新しい硬化層の開発

## Development of New Hard Layer for Underwater Pelletizing Die-Plate



博士(工学) 植田 直樹\*  
Dr. Naoki Ueda



渡部 勇介\*\*  
Yusuke Watanabe



河野 裕之\*\*\*  
Hiroyuki Kawano



橋本 知典\*\*\*  
Tomonori Hashimoto

## 要 旨

押出機1台あたりの最大処理量は年々増加しているため、水中造粒機には耐久性と安定性がより一層求められている。そこで当社は、水中造粒用ダイスに使用する新しい硬質層材料 JSW-HA を開発した。工業用水に浸漬した JSW-HA の腐食速度は現行材料である JSW-T よりも高いものの、JSW-HA の曲げ強度およびたわみ量は、JSW-T よりも高かった。さらに、ピンオンディスクの摩耗試験では、ダイスに相当するディスクとカッタ刃に相当するピンの摩耗量が、いずれも現行材料よりも低かった。また、当社開発センターで実施した造粒テストでは、原料ペレットと遜色のない形状の樹脂ペレットが得られた。

## — Synopsis —

As the maximum throughput per extruder increases year by year, it must be more necessary of durability and stability for underwater pelletizing system. Therefore, we have developed a new hard layer material, JSW-HA, for the underwater pelletizing die plate. The bending strength and deflection amount of JSW-HA were higher than those of the current JSW-T, and the corrosion rate of JSW-HA, immersed in industrial water, was higher. Furthermore, in the pin-on-disk wear test, the amount of wear of the disk and the pin, which corresponds to the die plate and the pelletizing knife, respectively, were both lower than that of current standard material. In the pelletizing demonstration test at our development center, resin pellets with uniform size and shape were obtained.

## 1. 緒 言

水中造粒機(Underwater cutting system : UWC)は、規則的に配列された直径数 mm のノズルを多数有するダイスと、ノズルから吐出された熔融樹脂を素早く切断するカッタ装置から構成されている。水中でカッティングが行われるので、樹脂ペレット同士の固着を防ぎながら、形状の良好な樹脂ペレットを大量生産できる装置である<sup>(1)</sup>。ほとんどのダイス表面には、摩耗低減のために、硬化層が接合されている。

図1に、樹脂ペレット製造に関わる大型造粒機の機器構成の一例を、写真1にUWC用ダイスが取り付けられた大型造粒機の外観をそれぞれ示す。UWC用ダイスの大きさは様々であるが、時間当たりの生産量が80tonに達する大型造粒機の場合、ダイスの直径は1mを超え、ノズル数は8千個にも達する。

本報では、新たにUWC用ダイス向けに開発した、新硬化層“JSW-HA”について紹介する。

\* : 産業機械事業部  
Industrial Machinery Business Division

\*\* : 広島製作所 技術開発部  
Technical Development Department, Hiroshima Plant

\*\*\* : 広島製作所 樹脂製造機械部  
Plastics Machinery Department, Hiroshima Plant

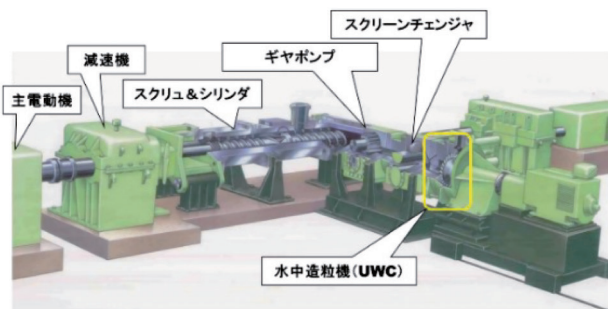


図1 樹脂ペレット製造に関わる大型造粒機の機器構成の一例

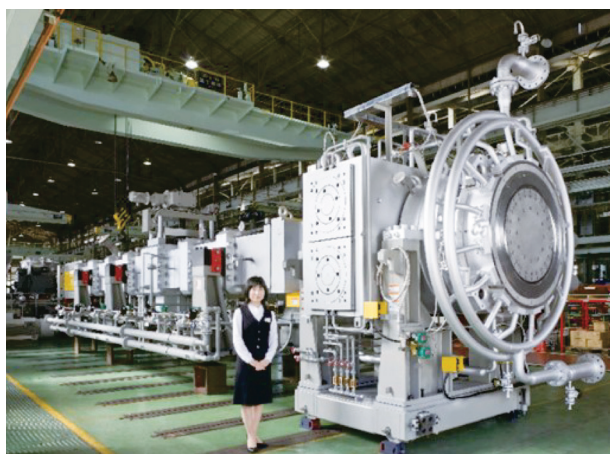


写真1 UWC用ダイスの取り付けられた大型造粒機の外観

## 2. 新硬化層 JSW-HA の開発目的

図2にダイスのノズルから吐出された溶融樹脂のカッティング状況の模式図を示す。ダイスへ押し付けられたカッタ刃が、ダイス表面を素早く滑るように回転することで、溶融樹脂が次々に切断されて大量の樹脂ペレットが生み出される。この間、カッタ刃の刃先とダイス表面は水中において高速で擦れ合い、両者に摩擦やキャビテーションエロージョンなどの損傷が起こり得るので、当社では、鉄(Fe)にクロム(Cr)やニッケル(Ni)などの合金元素を添加した金属素地(マトリックス)中に、炭化チタン(TiC)粒子を分散した硬化層(JSW-T)をダイス表面に接合しており、その優れた耐久性は樹脂ペレット製造装置の安定運転に貢献している。

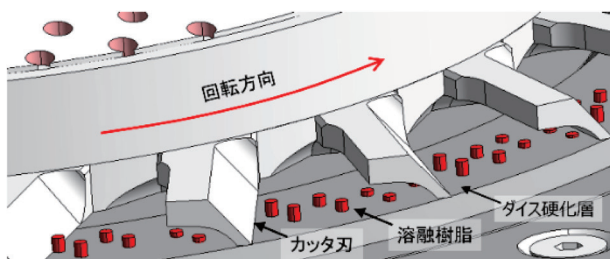
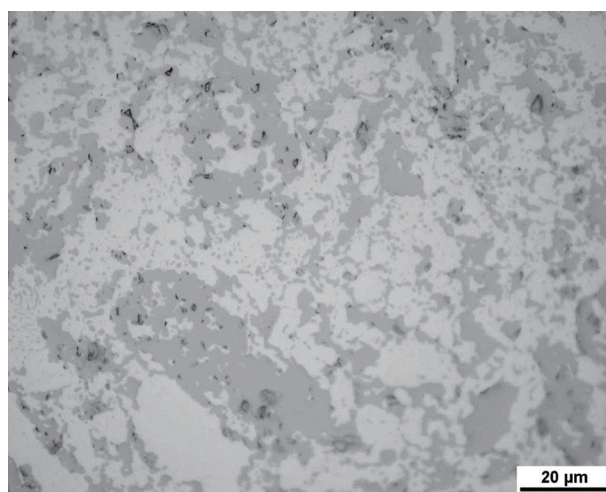


図2 溶融樹脂のカッティング状況の模式図

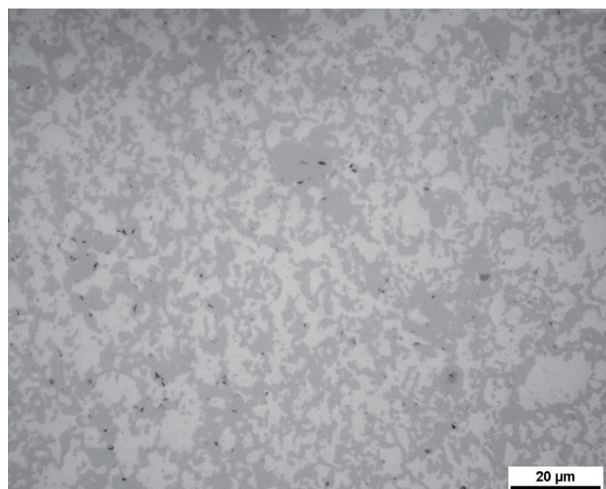
しかし、押出機一台当たりの最大処理量は年々増加を続けているため<sup>(2)</sup>、製造ラインの停止時間を減らしつつ生産性を高めるために、カッタ刃とダイスの耐久性に対する要求が益々高まることが予想される。このような高い要求に対応できるUWC用ダイスを提供するためには、現行よりも耐摩耗性の優れた新しい硬化層材が必要である。そこで、当社独自の材料設計をもとにして、新しい硬化層JSW-HAを開発した。次章より、JSW-HAの特徴について述べる。

## 3. JSW-HA 硬化層材のマイクロ組織

写真2に、現行の硬化層JSW-TおよびJSW-HAのマイクロ組織を示す。両材のマイクロ組織の共通した特徴としては、薄い灰色を呈したマトリックス中に、濃い灰色を呈した硬質粒子が分散している点である。硬質粒子は主として非常に硬いTiCであり、TiC粒子の含有量もほぼ同等である。しかし、TiC粒子の分散状態に着目して両材を比較すると、JSW-HAはTiC粒子をマトリク



(a) JSW-T



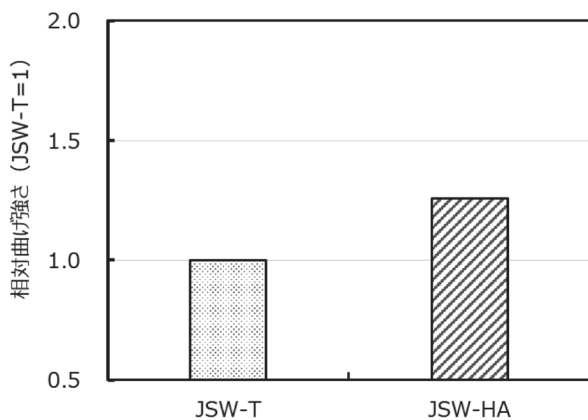
(b) JSW-HA

写真2 JSW-T および JSW-HA のマイクロ組織

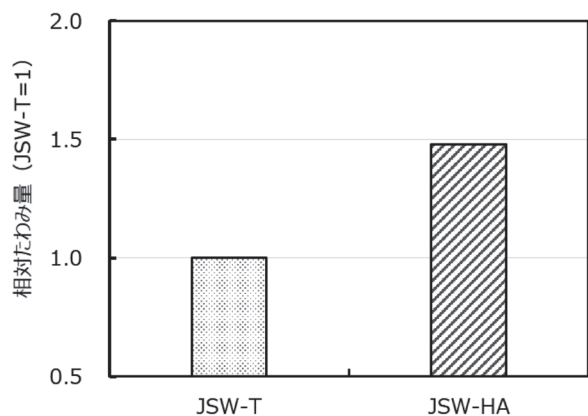
ス中に均一分散させるように設計しているため、JSW-TよりもTiC粒子が均一に分散している。TiC粒子は焼結の過程でマトリックスと親和し、高い界面結合性を発現することで、焼結後の素材の強度を向上させる。また、共に焼結法によって製作された硬化層であるが、JSW-HAのマイクロ組織中に見られる空隙は極めて小さく、その量も少ないことから、マイクロ組織は緻密であり、焼結状態も良好である。その結果として、次章で述べる通り、JSW-HAの曲げ強度はJSW-Tよりも高い。

#### 4. JSW-HA 硬化層材の曲げ強さ

運転中、UWCダイス表面に接合された硬化層の表面は、ペレット冷却搬送水(Pellet Conveying Water: PCW)によって常に冷却され、さらに、カッタ刃が押し付けられながら、ほぼ絶え間なく高速で摺動するので、硬化層の表面には摩擦力も加わる。一方で、ダイスとの接合界面側はヒータにより加熱されている。このような過酷な環境において使用される硬化層の耐久性は、いくつもの材料特性に影響されるが、その中でも硬化層の強度は重要な材料特性と考えられるので、JSW-TとJSW-HAの曲げ強度試験により強度を比較した。



(a) 相対曲げ強さ



(b) 相対たわみ量

図3 3点曲げ試験結果

図3にJSW-TおよびJSW-HAの3点曲げ試験結果を示す。試験片の寸法は幅4.0mm×厚さ3.0mm×長さ40mmの角柱である。JSW-HAの結果は、JSW-Tの曲げ強さを1とした時の相対値で表している。両材の曲げ強さを比較すると、JSW-HAの曲げ強さはJSW-Tに比べて約26%高い。また、材料のじん性に関わるたわみ量についても、JSW-HAのたわみ量はJSW-Tに比べて約48%高いので、JSW-HAは硬化層としてJSW-Tより優れた強度特性を有していることが分かる。これらの優れた特性は、JSW-Tと比較して、JSW-HA中のTiC粒子の分散が均一であり、また、Niが多く添加されていることによるものと考えられる。

#### 5. JSW-HA 硬化層材の耐腐食性

前述の通り、UWCダイス表面に接合された硬化層は常にPCWに曝されているため、硬化層の耐食性も重要な特性である。一般的に0.1mm/y以下の腐食度の材料であれば、耐食材料として使用できる<sup>(3)</sup>。そのため、JSW-HAの腐食度を確認するため、流動蒸留水による腐食試験を実施した。水温は90℃、流速は5m/s～7m/s、試験時間は72hとし、外径15mm×内径11mm×長さ50mmの中空円筒の試験片を使用した。蒸留水はヒータ付きの水槽からポンプで送り出されて、試験片の内面を流れた後、元の水槽へ戻る仕組みになっている。耐食性は試験片の重量変化と試験片の内表面の表面積から、腐食度(mm/y)を計算して、JSW-Tの耐食度と比較した。

図4にJSW-TおよびJSW-HAの流動蒸留水による腐食試験結果を示す。72hの試験後に両者の質量を測定し、腐食度を算出した。その結果、JSW-HAの腐食度は0.021mm/y、JSW-Tは0.002mm/yであり、流動蒸留水に対するJSW-HAの腐食度はJSW-Tよりも大きいことが分かった。しかし、前述の0.1mm/y以下の腐食度を

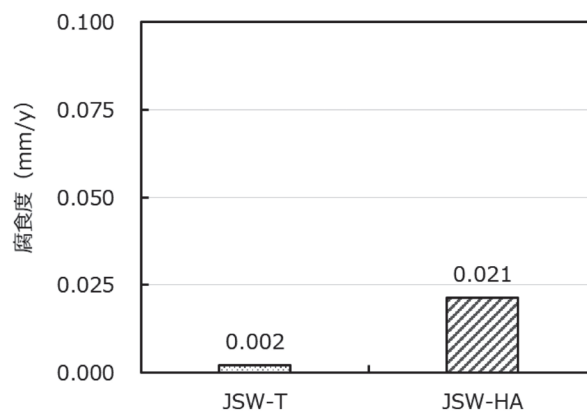


図4 流動蒸留水による腐食試験結果

達成できているため、JSW-HA は実用上十分な耐腐食性を有していることが確認された。なお、JSW-T に比べて JSW-HA の腐食度が大きいのは、マトリックスの Cr 含有量が JSW-T より少ないためであると考えられる。

### 6. JSW-HA 硬化層材の耐摩耗性

UWC ダイスの硬化層にとって、カッタ刃との摩耗の相性も非常に重要な特性である。JSW-HA とカッタ刃との相性が JSW-T よりも劣り、カッタ刃の寿命を縮めるのであれば、硬化層材としての使用は難しい。そこで、pin-on-disk 摩耗試験を用いて、JSW-T および JSW-HA と現行のカッタ刃材の組み合わせにおける摩耗量を比較した。

図 5 に pin-on-disk 摩耗試験の模式図を示す。Pin の寸法は直径 5mm × 長さ 8mm、disk の寸法は直径 60mm × 厚さ 5mm である。本試験の場合、高速回転している disk に対して、静止している pin が押し付けられる形態なので、pin と disk の動作は実際のダイスとカッタ刃と逆になる。しかし、pin は disk の同一円周上を摺動するので、相対的な動きとして、カッタ刃がダイス表面を摺動する状況に近い。

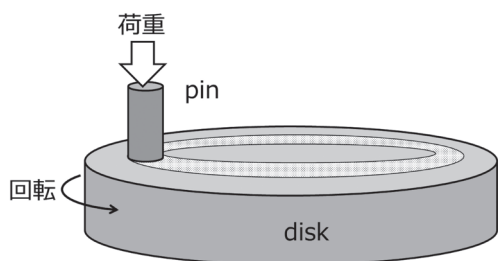


図 5 pin-on-disk 摩耗試験の模式図

試験条件は面圧 1.2MPa、回転数 2500rpm、試験時間 1h であり、チラーにより水温 25℃ の工業用水を循環しながら水槽中で行った。

表 1 に pin-on-disk 摩耗試験における disk 材と pin 材の組み合わせを示す。Set A は、当社の標準カッタ刃の JSW-T を pin と disk の双方に適用した、現在の標準的なカッタ刃とダイス硬化層の組み合わせである。一方、Set B は、JSW-T 材を pin、JSW-HA を disk に適用した、標準的なカッタ刃と新しいダイス硬化層との組み合わせである。

表 1 pin-on-disk 摩耗試験における disk 材および pin 材の組み合わせ

	pin 材	disk 材
Set A	JSW-T	JSW-T
Set B	JSW-T	JSW-HA

図 6 に pin-on-disk 摩耗試験結果を示す。Set B の結果は、Set A の摩耗体積を 1 とした時の相対値である。まず、pin の摩耗については、Set A の pin 摩耗体積に対する Set B の pin 摩耗体積は約 0.08 なので、pin の摩耗が非常に小さい。また、Set A の disk 摩耗体積に対する、Set B の摩耗体積も約 0.07 であり、disk の摩耗も非常に小さい。

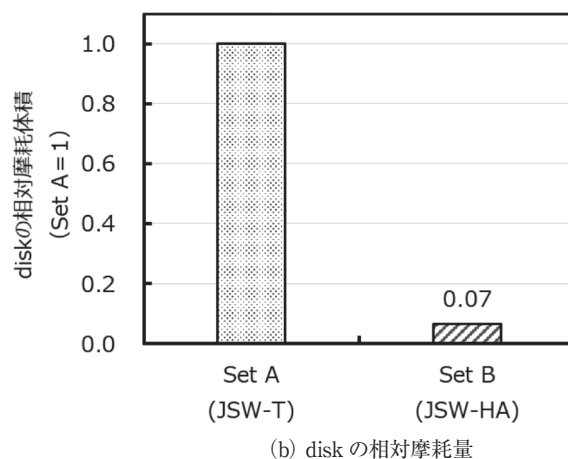
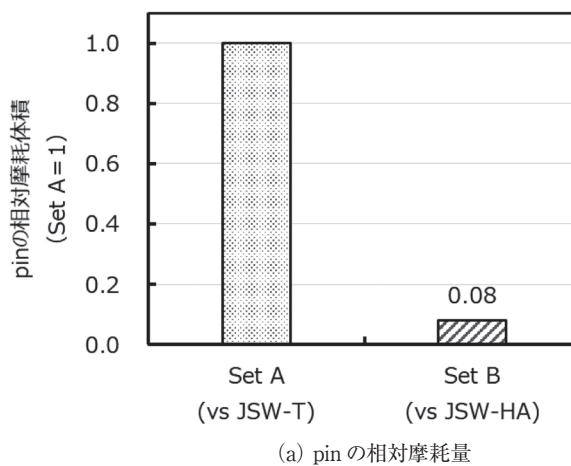


図 6 pin-on-disk 摩耗試験結果

図 7 に pin-on-disk 摩耗試験中における摩擦係数の経時変化を示す。試験の開始後、Set A の摩擦係数は上昇を続け、約 120s 後に 0.4 程度まで達している。一方、Set B の摩擦係数も試験開始から 30s 後に 0.4 程度まで上昇する。その後、Set A の摩擦係数は  $0.31 \pm 0.05$ 、Set B の摩擦係数は  $0.23 \pm 0.07$  の範囲を推移しているので、Set B の摩擦係数は Set A より若干低いものの、摩擦係数の変動はやや大きかった。

Pin-on-disk 摩耗試験における摩耗形態は凝着摩耗なので、微視的な現象は、pin と disk の真実接触部が摩擦によりせん断されて相手材料を千切り取る<sup>(4)</sup>、というプロセスで進行する。

前述の通り、JSW-T と JSW-HA の硬質粒子は同じであるが、硬質粒子の分散状態やマトリックス中の合金元

素の種類と含有量は異なる。今回、試験は水中で行われているので、JSW-HA のマトリックスと水の反応によって、摩擦面の状態に差が生じた結果、JSW-HA の摩擦が抑えられた可能性が考えられる。そこで、pin-on-disk 摩耗試験後の disk 断面を観察した。

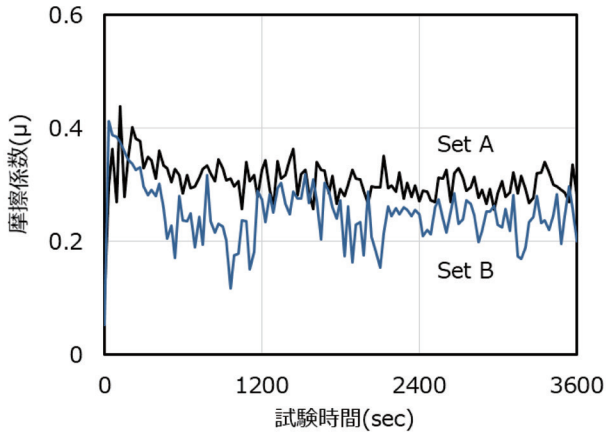


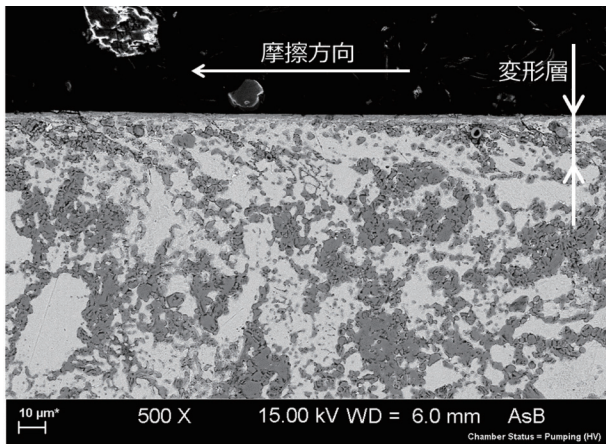
図7 pin-on-disk 摩耗試験における摩擦係数の経時変化

写真3および写真4は、走査型電子顕微鏡によるJSW-T および JSW-HA の断面観察結果をそれぞれ示す。JSW-T の摩擦面には、厚さ 3μm 程度の摩耗変質層が形成されており、その下に摩擦方向に向かって傾いた厚さ

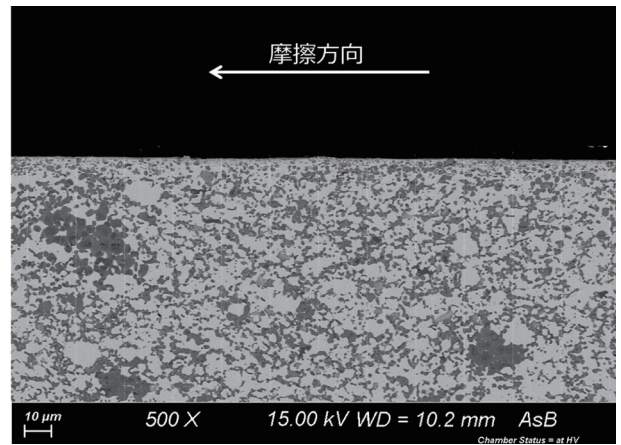
30μm 程度の変形層も見られる。一方、JSW-HA の摩擦面に形成されている摩耗変質層は厚さ 1μm 程度と薄く、変形層は JSW-T と比較して明瞭ではない。また、JSW-HA の表面起伏は JSW-T よりも小さく、平坦である。

純水中における黄銅の摩耗では、摩擦面の適度な酸化膜と水による潤滑作用により、接触点で殆ど千切り取られず、摩擦力によって摩擦方向に適当に流動することで、だんだんと摩擦面の平滑化が進み、この平滑化が水の小さい潤滑作用を生かして摩耗を少なくしているとの報告<sup>(5)</sup>がある。

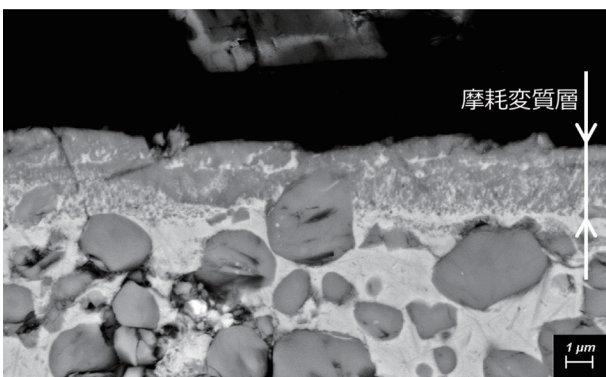
今回の pin-on-disk 試験は水中で行われ、試験後の JSW-HA のディスク摩耗断面は JSW-T よりも平坦で、摩擦係数も若干小さかった。水の粘度は潤滑油に比べて低いために、水膜は切れやすいが、相対的には摩耗面の粗さが小さく平坦なほど水膜は切れにくく、摩擦係数は低くなると考えられる。したがって、JSW-HA の摩耗量が JSW-T より小さかったのは、JSW-HA では JSW-T と比較して TiC の粒径が小さく、均一に分散しているため平坦な摩耗面が形成された結果、JSW-T に比べて水による潤滑の効果が大きくなったためであると考えられる。



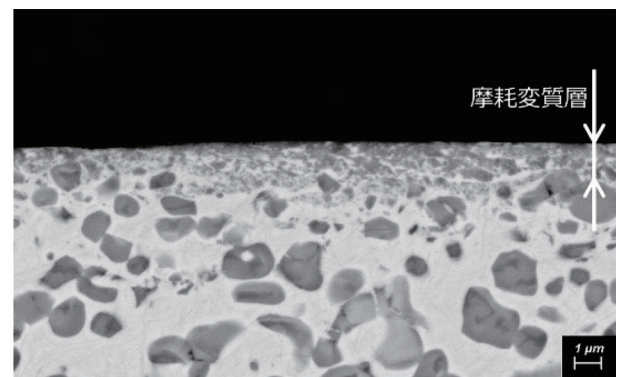
(a) 低倍率



(a) 低倍率



(b) 高倍率



(b) 高倍率

写真3 pin-on-disk 試験後の JSW-T の断面観察結果

写真4 pin-on-disk 試験後の JSW-HA の断面観察結果

## 7. 実機による造粒テスト

JSW-HA を接合した UWC ダイスのカッティング性能を評価するため、当社広島製作所の技術開発センターにおいて、造粒テストを実施した。

写真5に、今回開発した硬化層 JSW-HA を接合した UWC ダイス(DS145)の外観を示す。押出機は CIM90、原料樹脂は MI (熔融指数) =70 の PP ペレット、処理量は約 160kg/h、カッタ刃(1組3枚)は、pin-on-disk 摩耗試験と同じ JSW-T とした。カッタ刃の回転速度や接触圧力などの条件は、実際の運転条件を参考に設定した。

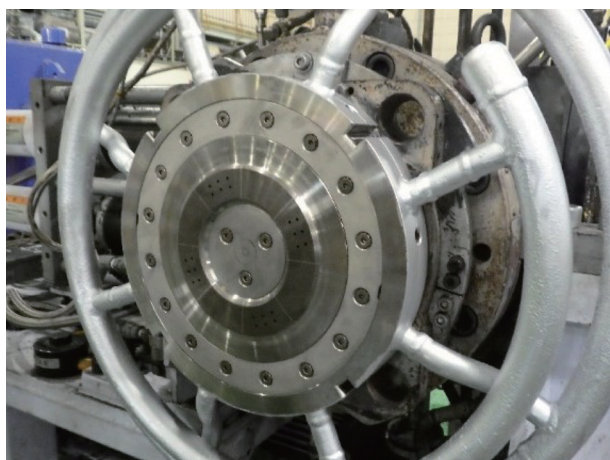


写真5 JSW-HAの接合されたUWCダイス(DS145)の外観

写真6および写真7に、造粒テストで用いた原料ペレット外観、および造粒テストで得られたペレットの外観をそれぞれ示す。造粒テスト後のペレットの大きさや形状は均一であり、今回の造粒テストの原料ペレットと比較しても遜色のない形状であった。造粒テストにおける運転時間は、一般的な実機の運転時間と比べて非常に短い。造粒テスト後に実施した調査の結果、JSW-HAの摩耗は計測されなかった。

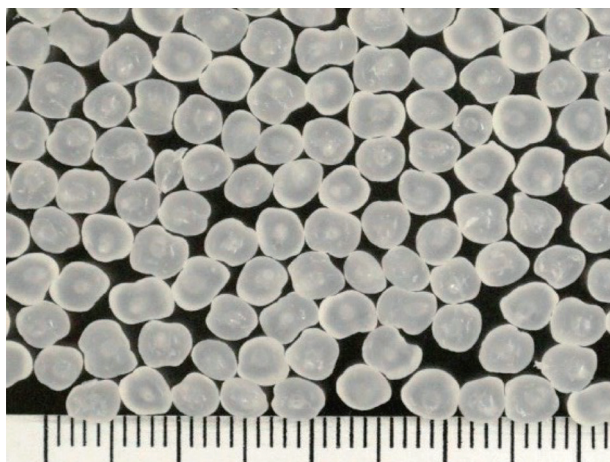


写真6 造粒テストで用いた原料ペレット外観

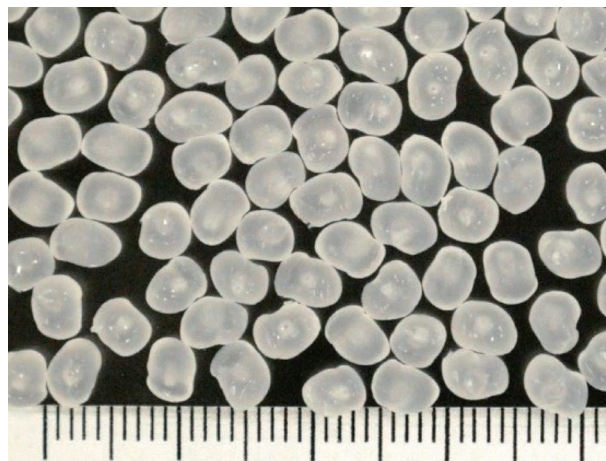


写真7 造粒テストで得られたペレット外観

## 8. 結 言

今回、UWC ダイスの耐久性向上を目的として、新しい硬化層 JSW-HA を開発した。JSW-HA は曲げ試験や pin-on-disk 摩耗試験において、現行の硬化層 JSW-T よりも高い性能を発揮した。また、造粒テストの結果についても、現行ダイスと遜色ないペレットが得られることが分かった。今後、JSW-HA を接合した UWC ダイスの長期運転時の摩耗調査を終えた後、本格的に製品化する予定である。

## 参 考 文 献

- (1) 山本博利：“成形および加工機械の最近の進歩 - 混合機およびペレタイザー”，高分子, Vol.19 (1970) No.224, pp.951-959
- (2) 石川誠, 清水陽平, 原脇六四, 金岡信之, 猫西正敏, 戸田賢二, 栗原正夫, 山澤隆行：“大型造粒機の技術変遷と将来展望”，日本製鋼所技報, No.71 (2020), pp.21-30
- (3) 小岩正倫：“金属の腐食損傷と防食技術”，pp.1-2, アグネ承風社 (2007)
- (4) 長谷垂蘭：“トライボロジーの基礎”，精密工学会誌, Vol.81 (2015) No.7, pp.643-647
- (5) 土肥元達, 佐藤泰作, 葉山房夫：“水潤滑化の黄銅の摩耗”，日本金属学会誌, Vol.40 (1976) No.7, pp.712-713