



燃料デブリ取り出しに向けた ジオポリマーの適用可能性に関する研究

Study on application of geopolymer to the retrieval of the fuel debris

東京大学大学院
東京大学大学院
東京大学大学院

酒井 泰地
鈴木 俊一
岡本 孝司

Taichi SAKAI
Shun-ichi Suzuki
Koji Okamoto

Non-Member
Member
Member

Abstract

In this study, an alternative method to retrieve fuel debris and MCCI (Molten Core Concrete Interaction) products in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants is proposed, where geopolymer is used for semi-stabilization of fuel debris. In order to implement this method, the fluidity and the setting time of geopolymer are regarded as one of the important issues. Thus, for investigating and evaluating those properties, slump flow experiments, funnel experiments and viscosity measurements have been performed. The results show that even in hot temperature or in water, geopolymer SIAL® can perform enough workability in each process of its application such as transportability, spreading ability and solidification ability. The results also indicate that the viscosity is sensitive to the raw material of the products, but after some additional experiments, it was found that the setting time could be controlled by adding only a few amount of water.

Keywords: Fukushima, Fuel debris, Decommissioning, Geopolymer, Fluidity,

1. 序論

福島第一原子力発電所の廃止措置で最大の課題である燃料デブリ取り出しは2021年からの開始に向けて工法の検討が進められている[1]。取り出し案として冠水工法と気中工法が主に検討されているが、格納容器の止水や放射性核種を含む粉塵の飛散防止など不確定要素が多い。

これに対し、鈴木らはジオポリマーを活用した新しい燃料デブリ取り出し工法を提案している[2][3]。この工法は、格納容器底部に落下した燃料デブリ表面をジオポリマーで被覆することで、時間経過に伴う性状が変化する燃料デブリや構造物の安定化などを実現するとともに、放射性物質の飛散を抑制する特徴を有する(Fig.1)。

昨年、福島第一原子力発電所2号機及び3号機においてPCV内部調査が行われ、燃料ハンドルや制御棒がPCV底部において観察された[4][5]。この結果はとともに事故時にRPV底部に制御棒のRPV貫通孔よりも大きな開口部が生じたことを示しており、燃料デブリ取り出し時にはRPV底部をより安定な状況にして作業安全を高める必要性があることを示唆している。

連絡先:酒井泰地、〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1、
東京大学大学院工学研究科原子力国際専攻、
E-mail: taichi.eande.14@gmail.com

このように、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出しを完遂するためには、現状並びに将来を見据えて、数多くの視点から課題を捉える必要があり、ジオポリマーを安定被覆材として活用し、一旦安定化してから取り出しを行うことは、工法として極めて有望な選択肢であると判断される。

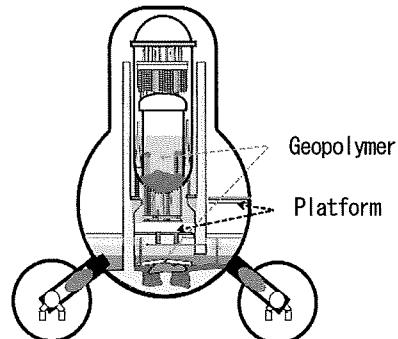


Fig. 1 Fuel Debris Retrieval Stabilized by Geopolymer

ジオポリマーはアルカリシリカ溶液とアルミナシリカ粉末の脱水縮合反応によって形成される非晶質ポリマーの総称であり[6]、耐放射線性・耐熱性・含有水の少なさ等の特徴を有しているため、福島第一原子力発電所の廃止措置にも汚染水二次廃棄物処理などの分野への適用が検討されている[7]。しかしながら、ジオポリマーは通常のセメントコンクリートに比べて混練から固化までの時

間が短いため、本工法への適用を考える上では施工性に関する検討が不可欠である。特に、水中環境や高温環境などより過酷な環境における流動挙動の特性を把握することは重要である。

以上より、本研究ではパラメータサーベイ及び詳細な施工性調査を通してジオポリマーの施工可能性を評価し、燃料デブリ取り出し工法の成立性について検討を行う。

2. 施工性パラメータサーベイ

本節ではジオポリマーの特性把握を目的に実施した粘度測定試験・漏斗試験・スランプフロー試験の3種類の試験について結果を示す。

2.1 試験材料

本試験では、Wood Group plc.が開発したジオポリマー SIAL®を試験材料として用いた。本材料の選定理由としては流動性を調整できるという点が挙げられる[8]。従来のジオポリマーは凝結時間が短く長距離の輸送などを伴う大規模な施工への適用は困難とされてきたが、SIAL®は原材料の配合比を変更することで、凝結時間をコントロールすることができる。このため、SIAL®を用いて格納容器外部からの長距離輸送やアクセス困難な環境下での施工などを実施できる可能性がある。

本試験のうち漏斗試験及びスランプフロー試験については、混練後2時間、4時間を経過したSIAL®を使用した。さらに粘度試験と漏斗試験では、比較としてセメントペーストとモルタルを用いた試験も実施した。

2.2 試験手法

2.2.1 粘度測定試験

粘度測定試験では粘度計を用いて試料粘度の経時変化を測定した。計測は混練開始から6時間経過するまで1時間毎に行った。この値はグラウト材に想定される施工時間がおよそ数時間であることから設定された。

2.2.2 漏斗試験

漏斗試験では、歐州規格のSTN EN 12350-9に準拠したV型漏斗(Fig.2)に充填された試験材料を流下させ、その落下時間を測定することで流動特性を把握した[9]。なお、セメントペーストおよびモルタルの試験では、国内規格のJSCE-F-512に準拠した漏斗[10]を用いており、寸法が厳密には異なるが、吐出口の大きさが等しいことを踏まえ、本研究では同一の試験とみなして実施した。

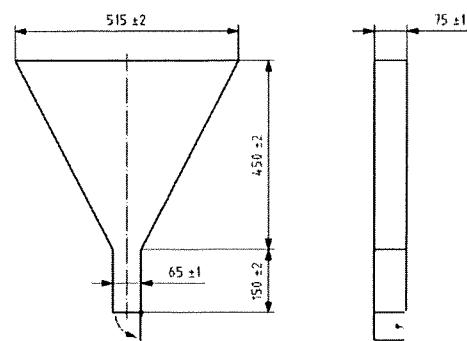


Fig. 2 V Shape Funnel Test

2.2.3 スランプフロー試験

スランプ試験では、試験材料をスランプコーンに充填し引き抜くことにより、ステンレス製のプレート上で流動させ、スランプフロー値を計測した。スランプフロー値については、スランプの最長半径とその直角方向半径を平均化して評価を行った。なお、スランプコーンは上径26mm・下径50mm・高さ44mmの特注品を使用した。

本試験では、実機環境を想定して試験環境および床面温度のパラメータを設定した。燃料デブリは現在水冷されているが、将来的には空冷状態で取り出しを行うことも予想される。燃料デブリの表面温度は未だに不明であり、特に空冷の場合は高温状態の燃料の上で施工が行われる可能性がある。このため、試験環境として水中条件及び気中条件を設け、このうち気中条件の試験においてはヒーターを用いて床面の温度を25°C・50°C・80°Cに設定し、高温環境下でのSIAL®の流動性について評価を実施した。また、水中条件の試験では、ガラスバットへの注水及びヒーターによる保温を行い、床面温度および水温を25°C・80°Cに設定し、高温水中環境を想定した試験を実施した。ここで、水中条件での実験装置図をFig.3に示す。

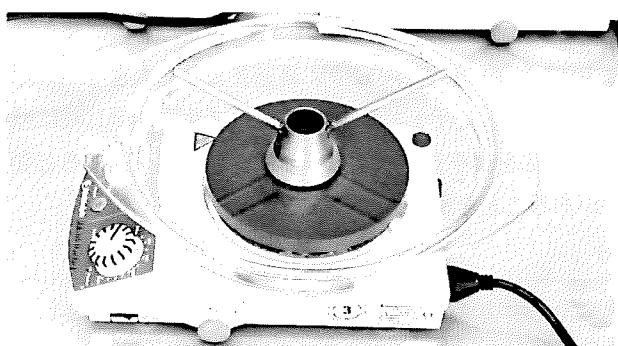


Fig. 3 Slump Flow Test (under water condition)

2.3 結果・考察

2.3.1 粘度測定試験

粘度測定試験の結果を Fig.4 に示す。

—●— SIAL® —○— Cement Paste —◎— Mortal

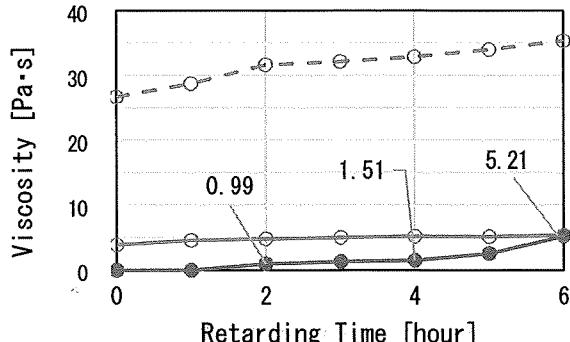


Fig. 4 Results of Viscosity

測定の結果、SIAL®が混練から 6 時間経過してからも 10Pa·s 以下の粘性を保っていることがわかった。また、SIAL®と同様に骨材を含んでいないセメントペーストの粘度の時間変化と比較しても、試験を行った全ての時間においてセメントペーストよりも低い粘度を示した。

(2 時間、4 時間、6 時間経過後、0.99、1.51、5.21Pa·s)

この結果から、想定される施工時間内において SIAL® は非常に高い流動性を保ち、本工法における適用の可能性が示唆された。

2.3.2 漏斗試験

漏斗試験の結果を Fig.5 に示す。

● SIAL® ○ Cement Paste ◎ Mortal

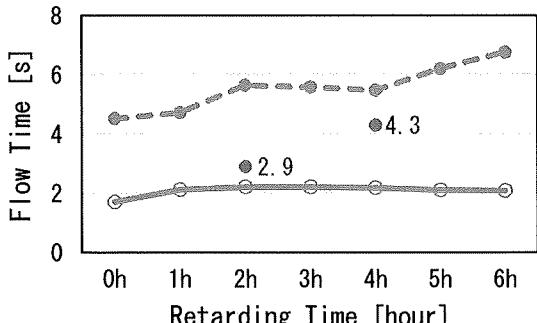


Fig. 5 Result of Funnel Tests

測定の結果、混練後 2 時間、及び 4 時間経過した SIAL® は、同じ混練時間のセメントペーストの結果よりも流下時間が大きく、同じ混練時間のモルタルの結果よりも小さいことがわかった。この結果から、本試験で用いた SIAL® が垂直方向の流動性においてセメントペーストとモルタルの中間程度の特性を有していると判断される。

2.3.1 に示した粘度測定試験との傾向の違いは、試験材料として用いた SIAL® が粘着質であることに起因すると考えられる。すなわち、混練後経過時間が増加するとともにジオポリマーの脱水縮合反応が進行し、水分子が構造中から抜け出した結果、漏斗壁面との摩擦が大きくなり、より低粘性の SIAL® の流下時間がセメントペーストよりも長くなったと考えられる。

2.3.3 スランプフロー試験

スランプフロー試験の結果を Fig.6 に示す。図中で A,B はそれぞれ混練後 2 時間、及び 4 時間経過した SIAL® で、水中及び気中において温度を変えて試験を実施した。

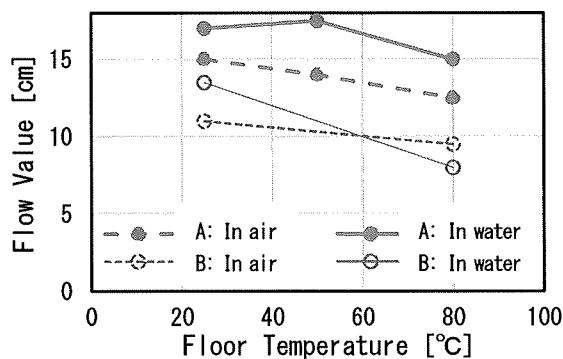


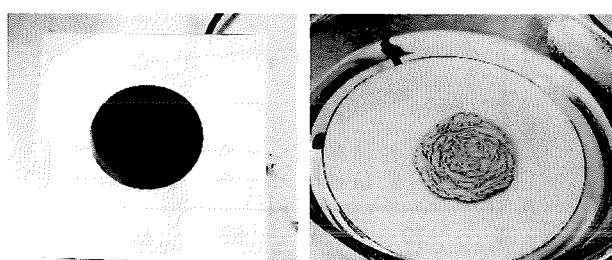
Fig. 6 Results of Slump Flow Tests

床面温度に着目すると、気中環境下では床面温度が 80°C の場合のスランプフロー値は床面温度 25°C の場合と比べて小さくなつた。この傾向は、ジオポリマーの固化プロセスに由来すると考えられる。すなわち、セメントコンクリートが水分子を自身の構造に取り込みながら凝結していくのに対して、ジオポリマーは脱水縮合反応によって自身の化学結合から水分子を放出しながら凝結する。室温程度の環境下では、微細な水分子を含むことで高粘性流体としての SIAL® に一定の流動性が保たれ緩慢に固化が進行していくのに対し、80°C 程度の高温環境下では、水分子が流体中から水蒸気として放出される速度が上昇するため、これに比例して SIAL® が早期に流動性を失い、スランプフロー値の減少に繋がつたと考えられる。この傾向は水中環境下においても同様に観察された。

続いて、試験環境のパラメータに着目すると、全体的な傾向として水中環境下でのスランプフロー値が気中環境下での結果よりも大きくなつた。この傾向は、周囲の水分子による脱水縮合反応の阻害、水圧による流動中の試験材料の上下方向の圧縮、浮力による床面との摩擦力の減少などが原因として考えられる。ただし、80°C 水中環境下のスランプフロー値は、同温気中環境下の値よりも小さ

な値を示した。これは、周囲の熱水から伝達される熱量が床面からの伝達に比べて大きいためと考えられる。特に SIAL® B は混練後 4 時間が経過しており既に脱水が進んだ状態でコーンに流し込まれるため、熱伝達による脱水縮合反応が加速され、流动の遲延への影響がより大きくなつたと推測される。

気中及び水中 80°C 環境下試験後における SIAL® B の固化後の様子を Fig.7 に示す。左図が気中環境下、右図が水中環境下での試験後の結果である。この図から 80°C 水中環境下試験後の SIAL® は積層構造になっていることがわかる。この理由として、コーンに流し込んでいる最中に既に凝結が始まっており、コーン引き抜きが行われた時点では既に SIAL® の大部分が固化した可能性が考えられる。



(a) Tested in 80°C air (b) Tested in 80°C water
Fig. 7 Geopolymer Solidified in High Temperature

3. 詳細な施工性調査

本節では、SIAL® の施工性調査を目的に実施した粘度測定試験・スランプフロー試験の 2 種類の試験について結果を示す。

3.1 試験材料

試験材料として、2.1 で記したものと同配合比率の SIAL® を用いた。SIAL® の原料のばらつきによって流动特性が変化することが予想されたため、同じ配合比の材料を用いて同一試験を実施した。

3.2 手法

粘度測定試験は 2.2 の手順と同一手法で実施した。スランプフロー試験も同様の手順で行った。ただし、スランプコーンは JIS R-5201 で規定された上径 70 mm・下部径 100 mm・高さ 60 mm のモルタルコーンを用いた。パラメータサーベイで実施したスランプフロー試験では、コーン引き抜き時にサクションが発生したため使用するコーンを見直し、本試験ではより扁平な形状のモルタルコーン

を採用した。

また本試験では、混練後経過時間と床面温度に加えて、ビーズ添加の有無をパラメータとして設けた。ジオポリマーを実際に燃料デブリ取り出しに適用する際には、グラウト材としての機能だけでなく、様々な他機能を付与させることが想定される。特に放射線遮蔽、臨界防止、伝熱性能向上などを目的として鉄やホウ素をジオポリマーに添加できれば、取り出しに適した材料設計を柔軟に行うことが可能となる。そこで、本試験では添加物が流动性に与える影響を調べるために Table 1 に示す 2 種類のビーズを添加した。試験条件を Table 2 に示す。

Table 1 Specification of Beads

Beads	Material	Diameter [mm]	Density [g/cm³]	Addition [wt. %]
Beads-S	Stainless Steel	0.14	7.93	10
Beads-L	Lead	4	11.35	10

Table 2 Condition of Slump Flow Tests

No.	Retarding time [h]	Floor temp [°C]	Beads
Ex-0	0	20	N/A
Ex-1			N/A
Ex-1S	1	20	Beads-S
Ex-1L			Beads-L
Ex-2			N/A
Ex-2S		20	Beads-S
Ex-2L			Beads-L
Ex-2'		50	N/A
Ex-2''		80	N/A
Ex-3	3	20	N/A

本試験は全て気中環境下で実施した。この理由は、Fig.6 から、SIAL® の水中環境下でのスランプフロー値が気中環境下よりもほぼ大きくなる傾向にあったため、気中環境下での測定を通してより保守的な値を取得できると判断したためである。ビーズ添加に関しては、調達できた試料量の制約から、床面温度が 20°C の条件のみ試験を実施した。また、ビーズを添加する SIAL® は、混練後 1 時間及び 2 時間の試料に限定した。

3.3 結果・考察

3.3.1 粘度測定試験

試験結果を Fig.8 に示す。SIAL®-A,B はそれぞれ混練後 2 時間、及び 4 時間経過した SIAL® である。

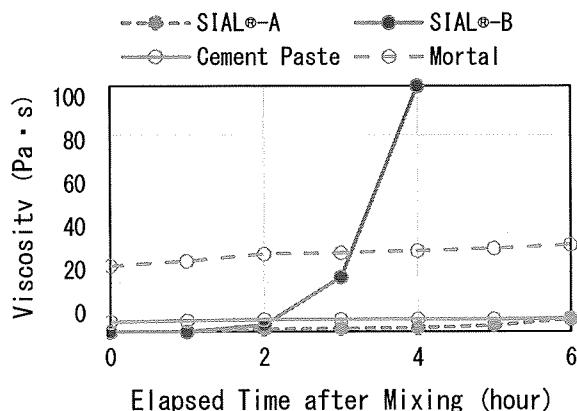


Fig. 8 Results of the Second Viscosity Measurement

図より、今回用いた試料の粘性が急増するタイミングが早く混練から 4 時間が経過した段階で粘度計の計測上限値を超えて凝結している。SIAL®混練時の材料組成比は同一のため、本結果で示される粘性特性の違いは素材の違いによるばらつきや保管期間中の温度・湿度等に起因すると考えられる。なお、本特性は、後述する水添加 SIAL®等の配合成分調整により、対応可能であることがわかった。

3.3.2 スランプフロー試験

床面温度 20°Cにおける結果を Fig.9 に示す。

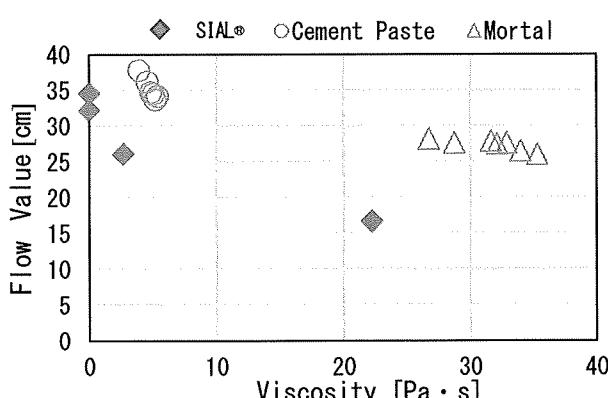


Fig. 9 Results of Slump Flow Tests with Different Viscosities

図から、SIAL®はセメントペースト及びモルタルよりも低粘度であるにも関わらずフロー値が低いが、この傾向の違いは、粘着性に起因すると考えられる。3.3.1 の結果より、セメントペースト及びモルタルの粘度は 6 時間経

過後もほぼ一定であり、スランプフロー値の減少も非常に低い。したがって、これら 2 材料はこの時間内では凝結過程に入っておらず水和反応がまだ初期段階にあると判断される。一方、SIAL®は混練から 2 時間経過して以降、粘度は上昇し続けスランプフロー値も混練後経過時間とともに低下している。この結果から、SIAL®は混練から 2 時間が経過した時点で既に凝結が開始しており脱水縮合が起こっていると考えられる。縮合によって分子結合から外れた水分子は水蒸気として放出されていくため、流動中の試料の含水率は時間経過とともに低下する。このため SIAL®の粘着性が増加し床面であるステンレス鋼板との摩擦が大きくなり、低いフロー値を示したと推測される。また、高温条件における結果を Fig.10 に示す。

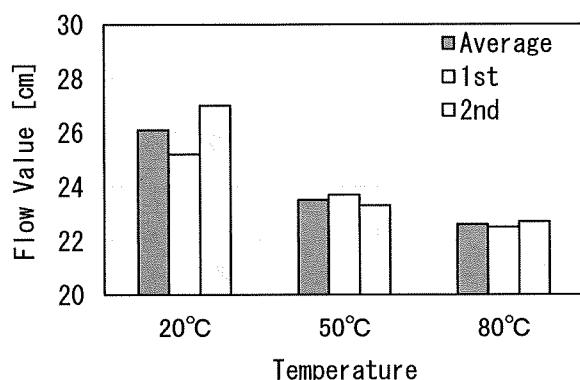


Fig. 10 Results of Slump Flow Tests with Different Temperatures

図より、2.3.3 で得られた結果と同様に床面温度の上昇に伴ってスランプフロー値は低下した。それぞれの試験条件における結果の標準偏差を Table 3 に示す。表に示すように、床面温度の上昇に伴い結果の標準偏差は小さくなつた。流動が進行しスランプ高さが低くなると床からの摩擦抵抗を受けやすくなりスランプの一部が停止しやすくなる。このため、スランプの形状が歪んでスランプフロー値の偏差も大きくなるため、スランプフロー値のばらつきは流動の後半に発生していると推測される。

Table 3 Standard Deviation of Slump Flow Tests

	1 st	2 nd	Average	Standard Deviation
Ex-2	25.2	27.0	26.1	0.9
Ex-2'	23.7	23.3	23.5	0.2
Ex-2''	22.5	22.7	22.6	0.1

ビーズを添加した SIAL®の結果を Fig.11 に示す。

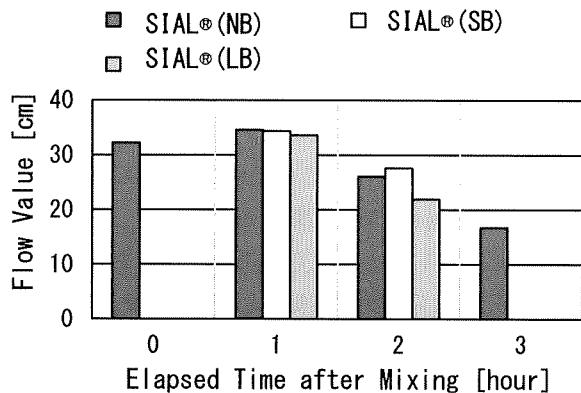


Fig.11 Results of Slump Flow Tests with Beads

ステンレスビーズを添加した Beads-S (SIAL® (SB)) に着目すると、ビーズを加えなかったケースと比較してスランプフロー値の差が 1.5 cm 以内に留まっており、ビーズ添加の影響は少ない。また、Ex-1S および Ex-2S のいずれにおいてもビーズは混練段階で試料中に均一に攪拌されたこと、流動段階でも一か所に沈殿せずにビーズがスランプに一様に分布したことから、SIAL®は 1Pa · s 以下の低粘性の状態でも、wt. 10%程度の添加量であれば、 $\phi \approx 0.1\text{ mm}$ の小径のビーズや粉末を輸送可能である。さらに、Beads-S を添加することで試料の見かけの密度は増加するが、スランプフロー値に大きな差がでなかつたことから、小径のビーズ添加による試料の見かけの粘性への影響は小さいと考えられる。

一方、鉛を添加した Beads-L (SIAL® (LB)) に関しては、Ex-1L ではビーズがジオポリマーとともに流動せず中央部に沈殿したままとなったのに対し、Ex-2L ではビーズの一部がスランプ中央部から輸送された。Ex-1L は、SIAL®が 1Pa · s 以下の低粘度であったため、径が大きく密度も高い Beads-L を輸送できなかったと考えられる。スランプフロー値も Ex-1 及び Ex-1S との差は微小であり、流れにほとんど寄与していない。また Ex-2L は、SIAL®の脱水縮合反応の進行により比重の高い Beads-L を輸送可能な粘度を有していると考えられる。さらに、Ex-2 と Ex-2L の間には 4.2 cm の差があり、スランプフロー値の明確な低下が確認される。Beads-S と Beads-L の添加重量%および密度が等しいこととビーズが一様に分布した Ex-2S の見かけの粘性がほとんど変化していないことを踏まえると、この低下は Ex-2L がビーズを輸送したことによって見かけの粘度が上昇したことが原因であると考えられる。

Fig.12 に、流動終了からおよそ 24 時間が経過した Beads-L 添加試料を示す。

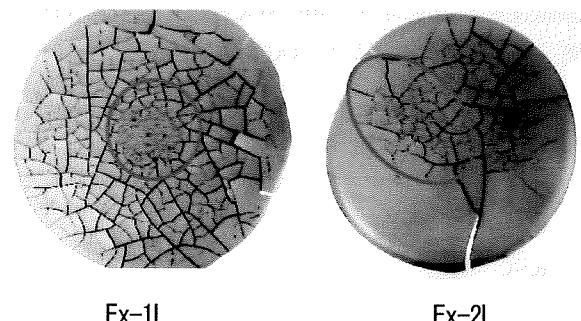


Fig.12 Slump of Geopolymer with Beads-L

図から、Ex-1L ではビーズが中央部に滞留しているのに對し、Ex-2L ではビーズの運動により見かけの粘度が上昇し、またビーズ輸送方向の流れを阻害していることがわかる。なお、図中に見られるクラックは、昼夜の寒暖による母材とビーズとの熱膨張差により発生しており、今後ビーズ密度の上限を検討する必要がある。

4. 工法の成立性に関する検討

本節ではこれまでの実験結果を踏まえてジオポリマーが燃料デブリ代替工法において施工可能であるか考察する。想定されるジオポリマーの施工段階は輸送工程・拡散工程・固化工程の 3 つに大別できるため、ここでは工程ごとにジオポリマー SIAL®の性能を評価する。

4.1 輸送工程

SIAL®の輸送性能に関しては、漏斗試験の結果からモルタル等と比較しても混練後 4 時間程度の時間内であれば優れた性能を有している。輸送性能を Table 4 に示す。欧洲規格における漏斗試験結果のグループで分類する [9]。この分類に基づけば、SIAL®の漏斗試験の結果は VF1 に該当しており、同材は隅々まで行き渡る施工性を有していることを示している。

Table 4 Category of Funnel Test Results

Class	Characteristics	V-funnel time in s
VF1	Capability of self-leveling	$t \leq 8$
VF2	Sensitivity to delays between successive lifts	$9 < t < 25$

また、セメントペーストと比べても混練後2時間が経過するまではSIAL®の方が低粘性であり、本材料が想定される施工時間において十分な流動性を持って輸送可能であると判断できる。ただし、本材料はセメント系材料と比較して粘着質であることが推測されるため、実際にジオポリマーを燃料デブリの準安定化に適用する場合には、接触が想定される材料との反応を事前に試験する必要がある。

4.2 拡散工程

スランプフロー試験の結果から、SIAL®は粘度が急増するまでは従来のセメント系材料と同等の拡散性能があると判断される。ただし、同じ配合比でも粘度特性や流動特性が大きく変わりうることに留意する必要がある。特に、高温条件下でスランプフロー値が低下したことから、材料中に含まれる水分量は流動特性を左右する重要な因子であると推測される。そこで、水分含有量を微増させたSIAL®を用いて比較試験を実施した。試験材料として、2種類の試験で用いたSIAL®の組成に1~2%の水を加えたものを使用した。ここではこの試料を便宜的に水添加SIAL®と呼称する。この水添加SIAL®を用いて4種類の試験を実施した。試験条件及び結果をTable 5及びFig. 13に示す。なお、全ての試験は気中で実施した。

Table 5 Test Results of Water added Geopolymer

Retarding Time [hr]	Floor Temp [°C]	Slump Flow Value [cm]
0	20	35.8
1	20	37.1
2	20	32.5
2	80	24.5

上記結果より、水添加SIAL®の全てのスランプフロー値は通常のSIAL®の結果よりも良好であり、床面温度が20°Cの条件下ではセメントペーストと同等の値を示し、水添加により粘度の時間変化が遅れることがわかった。また、床面温度が80°Cの条件下でも、スランプフロー値の流動幅は小さくなるものの、流動性の改善が見られた。以上から、微量水分の調整により原材料のばらつきを抑制可能なことがわかった。

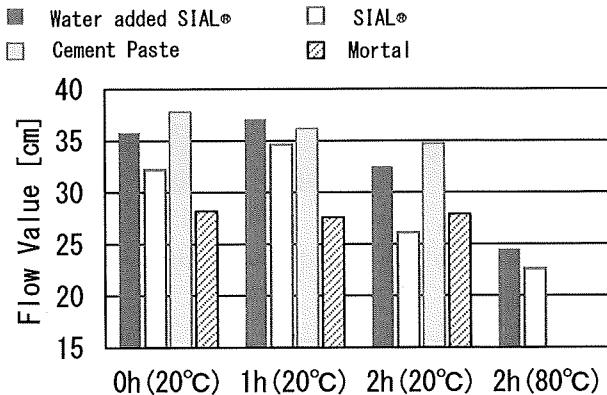


Fig. 13 Results of Slump Flow Tests of Water added SIAL®

また、水中での拡散性能については、20°Cの条件下ではスランプフロー値は同温気中条件よりも大きくなる一方、高温水中の条件下では同温度の気中条件よりも温度の影響が大きくなることがわかった。この結果から、燃料デブリを水冷する場合には水温を低く維持することが望まれる。また、床面温度50°C以上の気中条件下で脱水速度が上昇したことから、空冷を採用する場合には施工方法の工夫が必要になると想定される。

添加物については、小径かつ比重が小さい材料に関してはSIAL®の粘度によらず混練・輸送可能である一方、比重の大きい材料を高粘性のSIAL®に混練すると見かけの粘性が著しく増加し、流動性が低下する可能性があるため、添加物の小径化や適切な混練方法の採用等が必要と判断される。

4.3 固化工程

スランプフロー試験の結果より、80°C以下の条件下SIAL®が固化することが分かった。しかし、完全空冷を実施した場合 2021年時点での燃料デブリ表面の最高温度は300°C以上となることが予想されており¹⁾、非常に高熱の環境下でのジオポリマーの投入も可能性として想定される。そのため、本項ではさらに高温の条件での固化性能についても考察する。Fig. 14に高温中で固化させたSIAL®の断面図を示す。左が95°C水中で固化させた試料、右が300°C気中で固化させた試料である。なお、どちらも1層目が固化した後に2層目を投入している。またSIAL®はパラメータサーベイ及び詳細な施工性調査で用いたものと同じ組成比である。

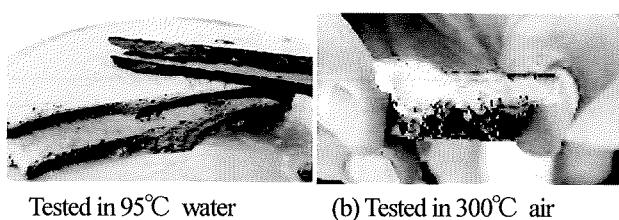


Fig. 14 Geopolymer solidified in High Temperature

図から、1層目は多孔質な構造となっており、特に300°C 気中固化条件での SIAL®において顕著に観察された。このことから、凝固過程において100°Cを超える加熱により、水分子が急速に蒸発し、多孔質を形成したと推測される。一方、2層目は従来の SIAL®と同様に密な構造となった。これは、2層目への床面からの熱輸送が1層目で遮蔽され、脱水速度が小さくなつたことが原因と考えられる。

この結果から、高温気中条件での施工についても、多層構造とすることにより、燃料デブリからの伝熱を抑制することで SIAL®の適用が可能であることがわかつた。

6. 結論

パラメータサーベイ及び詳細な施工性調査の2種類の実験を通してジオポリマーの一一種である SIAL®の施工性について評価を実施した結果、実機環境を想定した条件における各工程での施工性についてそれぞれ以下に示す結果が得られた。

輸送工程においては、SIAL®が高セルフレベリング性を備え、想定される施工時間において十分な輸送性能を持つことがわかつた。

拡散工程においては、想定される施工時間において従来の材料と同等の拡散性能を備え、燃料デブリの水冷及び空冷のいずれの条件においても適用できる可能性のあることがわかつた。また、少量の水添加により粘度特性を調整する事が可能であり、径や比重の調整を行うことで混練した添加物を輸送し拡散させることができることも判明した。固化工程においては、80°C以下の環境であれば健全な構造が保たれ、100°Cの高温水中環境及び300°Cの高温気中環境でも多層構造を適用することにより、ジオポリマー被覆施工の可能性が示された。

本研究では、SIAL®が実機環境を想定した条件下では、輸送・拡散・固化の各工程において十分な施工性を備えていることを明らかにした。この結果から、安定化材として

ジオポリマー-SIAL®を活用することは、大規模燃料デブリ取り出し時における有効な工法の一つとなりうると判断される。

謝辞

試験材料及び設備の提供や試験結果の討論等で Wood Group plc 及び富士電機の方々には多大のご協力を頂きました。特に Wood Group plc の Marcela Blazsekova, Milena Prazska, Pavol Stuller 様、富士電機株式会社の見上寿、関根伸行、小野崎公宏様には深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構，“東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2015”，(2015)
- [2] 鈴木俊一、田村雄介、岡本孝司、“俯瞰的アプローチによる福島第一廃止措置の新たな工法検討”，日本保全学会第13回学術講演会要旨集, pp. 482-483 (2016)
- [3] 鈴木俊一、岡本孝司、“ジオポリマーを活用した燃料デブリ取り出し工法の提案”，日本保全学会第14回学術講演会要旨集, pp.417-418 (2017)
- [4] 東京電力 HD㈱，“福島第一原子力発電所3号機原子炉格納容器内部調査について”、2017年11月30日
- [5] 東京電力 HD㈱，“福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内内部調査実施結果”、2018年2月1日
- [6] 河尻留奈、他、”ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究”，コンクリート工学年次論文集 Vol.33 No.1 pp.1943-1948 (2011)
- [7] 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第5回）東京電力ホールディングス株式会社，“水処理二次廃棄物の処理にむけた検討状況”、2-17年2月10日
- [8] All Deco s.r.o, “Research, Development and Properties of the SIAL® matrix”
- [9] bibm et al., “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”, pp.10-14,43-46,50-51 (2005)
- [10] コンクリート委員会規準関連小委員会，“コンクリート標準示方書 [規準編]”pp.270-271 (2013)

(平成30年5月25日受理、平成30年7月13日採択)