

廃FRP船のリサイクルの試み

林 慎也*、山根 健次**

Study on the Development of the recycling technology of waste FRP boats

by

Shinya HAYASHI and Kenji YAMANE

Abstract

In this report, a recycling technology of waste FRP boats which the have worked for a lot of years in Ship Research Institute is mentioned. Two technological methods are chosen for development of a recycling technology; one is thermal decomposition method for organic component, mainly resin, of FRP, and another is high temperature melting for inorganic component, mainly glass fiber.

By thermal decomposition, oils and gasses could be recovered from the resin with high recovery yield. The gasses have high caloric value of 8,938 kcal/Nm³ which are high enough to make good combustion, while several problems on physical properties of thermal decomposed oils and gasses recovered have been pointed out. That is to say, the recovered oils have the disadvantage of strong acidity, low igniting temperature, unfavourable ignition and so on.

The experiment of melting glass fiber up to 1000 °C was carried out successfully. Then, there was no problem in melting process, and glass fiber melted at 830~950 °C and cooled down to be solidifying into stone blocks with much void content. The porosity density can be controlled by melting temperature and cooling down velocity. The existence of porosity can be expected to work as an absorbing material and a filtering material.

Base on the both technology, thermal decomposition and high temperature melting, in Heisei 5, the moval disposing system for waste FRP boats was built, sponsored by Japan Marine Recreation Association. The results of an actual proof test of this system showed that disposing expence was smaller than other usual disposing method, and no polluting and hazardous material had been generated.

目次

| | | | |
|----------------------|----|-----------------------------|----|
| 1. まえがき | 20 | 2.3 熱分解回収油を燃料とする洋上処理システムの提案 | 26 |
| 2. 熱分解によるガス・油回収技術の検討 | 22 | 2.3.1 廃FRP船処分問題の背景 | 26 |
| 2.1 実験方法 | 22 | 2.3.2 洋上処理システムの提案 | 26 |
| 2.2 結果及び考察 | 22 | 2.4 まとめ | 28 |
| 2.2.1 回収物質 | 22 | 3. 熱処理残渣の溶融固化物の物性の調査 | 28 |
| 2.2.2 回収ガスの物性 | 23 | 3.1 実験 | 28 |
| 2.2.3 回収油の物性 | 23 | 3.1.1 供試材料 | 28 |

* 材料加工部

** 大阪支所

原稿受付 平成10年3月1日

審査済 平成10年5月13日

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.1.2 実験装置 | 29 |
| 3.1.3 実験方法 | 29 |
| 3.1.4 分析方法 | 30 |
| 3.2 結果及び考察 | 30 |
| 3.2.1 外観観察結果 | 30 |
| 3.2.2 元素分析結果 | 33 |
| 3.2.3 物性分析結果 | 34 |
| 3.3 まとめ | 35 |
| 4. 移動式 FRP 廃船処理装置の開発 | 35 |
| 4.1 開発に至る経緯 | 35 |
| 4.1.1 最終回収物の決定 | 35 |
| 4.1.2 開発目標と開発方針 | 35 |
| 4.2 装置の概要 | 35 |
| 4.2.1 乾留部 | 35 |
| 4.2.2 溶融部 | 38 |
| 4.2.3 補助装置 | 38 |
| 4.3 移動式 FRP 廃船処理装置の処理の流れ | 38 |
| 4.3.1 樹脂熱処理工程 | 39 |
| 4.3.2 熱処理残渣（ガラス繊維） 移動・破碎工程 | 39 |
| 4.3.3 残渣溶融固化工程 | 39 |
| 4.3.4 焼却・乾留ガスの処理・利用工程 | 39 |
| 4.4 実証試験 | 39 |
| 4.5 まとめ | 39 |
| 5. あとがき | 40 |
| 参考文献 | 40 |

1 まえがき

ガラス繊維強化プラスチック（FRP、Fiber Reinforced Plastic）はその軽くて強く、更に錆びないなどの優れた特性により昭和30年代後半には小型船舶・舟艇の構造材料として一般化した。さらに、船大工の高齢化と後継者の養成難、木材資源の枯渇といった条件が積み重なり、昭和40年代中頃から急速に船舶用材としての使用が拡がり、小型船の建造材料の王座を占めるに

至っている。レジャー用ボートは殆どがFRP製であり、漁船の場合には、50%以上がFRP材により建造されている。現在のFRP船年間建造数は約24,000隻（表-1）である。このようにFRP船が実用化して既に40有余年経った現在、初期のFRP船の廃船が発生している。しかし、その処理が簡単ではないことに加え、処理経費がかさむため、河川、港湾等への放置や不法投棄などが多発し社会的な問題になっている。

FRP船の廃船処理の問題は関係官庁においても実用化の際に既に認識されていた。昭和48年に【船舶安全法】の一部改正が行われ、FRP船の廃船処理問題に検討を加え、必要な対策を推進することが付帯決議された。これを受ける形で運輸省は小型船舶工業会に『FRP船廃船処理システム委員会』（昭和49～51会計年度）を設けFRP船の解体、処理、及び有効利用の方法について検討した。¹⁾ 更に、昭和55、56会計年度には『FRP船廃船解体処理方法に関する調査研究』によりウォータージェット切断による解体実験を実施した。²⁾ これらの検討により当初困難とされていたFRP船処理は不可能ではないこと、その経費が膨大であることやリサイクルは極めて困難であることが判明した。このような状況のもと、廃船の放置が再度社会的な問題となり、昭和60～61会計年度に運輸省は日本造船振興財団に『使用済みFRP船解撤・処理体制調査研究委員会』を、引き続き62会計年度には『使用済みFRP船解撤・処理体制推進委員会』を設け、廃FRP船の解撤・処理体制の確立を目指した。³⁾ また、同時期農林水産省及び通商産業省でも廃FRPの処理・有効利用を検討した。しかし、経費の問題及びリサイクルの困難さを解決することは出来ず、FRP処理の実用化には至らなかった。

船舶技術研究所が初めて廃FRP船の処分問題に取り組んだのは昭和60年である。当時は環境問題がクローズアップされて、廃FRP船の放置が問題になっていた。このような状況のもと、環境庁の公害防止等研究費による『FRP船廃船処理技術の研究』において、

表-1 わが国におけるFRP用途別出荷量

(ton)

| 用途別 年 | 建設資材 | 住宅機材 | 舟艇 船舶 | 自動車 車両 | タンク 容器 | 工業機材 | 雑貨 | その他 | 合計 |
|---------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 1992 | 34,800 | 185,500 | 30,500 | 24,500 | 51,200 | 58,100 | 36,300 | 12,800 | 433,700 |
| 1993 | 33,300 | 204,400 | 28,800 | 22,500 | 40,400 | 54,700 | 36,000 | 11,900 | 432,000 |
| 1994 | 38,300 | 211,500 | 28,800 | 21,600 | 54,900 | 54,900 | 35,900 | 11,600 | 442,600 |
| 1995 | 41,500 | 218,600 | 24,200 | 21,700 | 57,600 | 57,600 | 39,100 | 12,400 | 458,200 |
| 1996 (構成比) | 45,100 (9.4) | 230,100 (48.0) | 24,100 (5.0) | 22,300 (4.7) | 60,100 (8.9) | 60,100 (12.5) | 42,400 (8.9) | 13,000 (2.7) | 479,500 (100.0) |

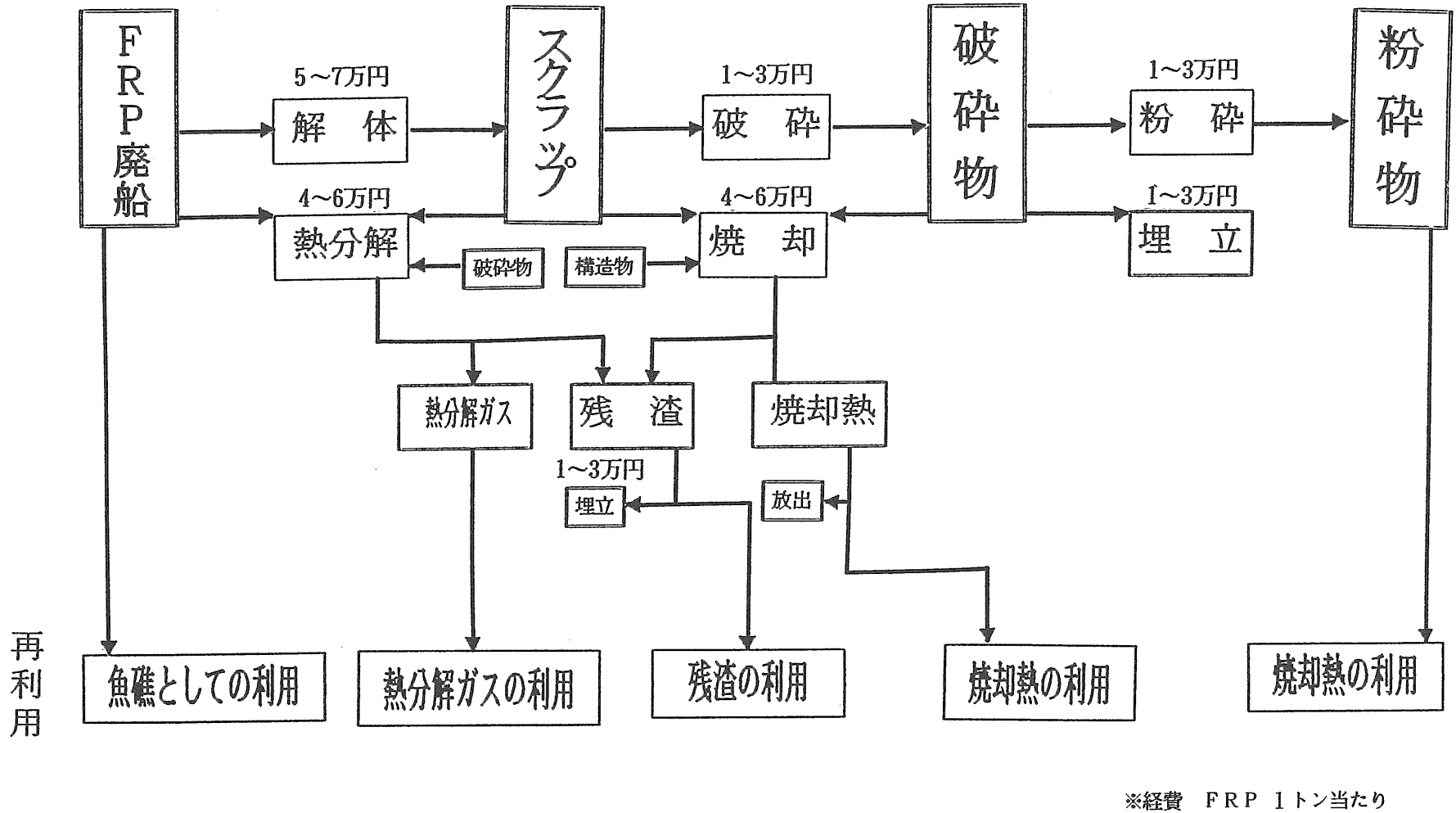


図-1 FRP の処理経費

技術的に困難であるとされていた廃FRP船解体を機械的切断、熱切断及び爆破切断により試み、解体が技術的には可能であることを明らかにした。⁴⁾しかし、多大な処分経費（経費概算 図-1）がネックとなり実際に廃船の処分が順調に進むまでには至らなかった。そこで、昭和62年頃から経費負担を軽減するために廃FRP船のリサイクルの試みを開始した。

本報では、船舶技術研究所で十数年にわたり試みている廃FRP船のリサイクル技術の検討結果についての概要を述べる。まず、昭和62年、FRPを構成している樹脂とガラス繊維を熱分解により分離処分することに着目し、(株)道前築炉工業の技術協力を得て樹脂より油・ガスの回収を試みた。さらに、この技術を基幹とする、解体経費と輸送経費が大幅節減可能な洋上FRP廃船処理システムを提案した。さらに、ガラス繊維のリサイクル方法として熔融・冷却固化を試み、その物性を調べた。また、熔融・冷却固化物を最終回収物とする移動式FRP廃船処理装置を(株)日本海洋レジャー安全・振興協会との共同研究開発により平成5年に完成した。

2 熱分解によるガス・油の回収技術の検討

プラスチック（樹脂）や木材のような可燃性物質（有機材料）から熱分解によりガス・油が回収できることは古くからの周知の事実である。FRPは樹脂（有機材料）とガラス繊維（無機材料）の複合材料であり、樹脂については熱分解によりガス及び油を回収が可能である。しかし、昭和50年代後半に多くの会社がタイヤの熱分解（ $\sim 750^{\circ}\text{C}$ ）を試み、回収パイプをタールで詰まらせるという失敗を起こしたことにより、熱分解技術は見限られていた。当所では、その原因が熱分解温度であると考えて低温の熱分解を実施した。この章では、FRPを熱分解する技術の検討と回収したガス及び油の物性の調査を行い、熱分解リサイクルの実用化の可能性を検討した結果について述べる。

2.1 実験方法

熱分解実験を行ったFRPは、樹脂（不飽和ポリエステル）含有率が60wt%及びガラス繊維含有率が40wt%である。船舶には通常この含有比率のFRPが使用されている。

実験に用いた熱分解炉はバッチ型外熱式熱分解炉（容量4.5ℓ）でその構成図を図-2に示す。この炉内にFRP試料（ $30 \times 30 \times 10\text{mm}$ ）を入れ、外部よりヒーターで加熱して熱分解し、熱分解により発生したガスを冷却しガスと油に分離回収した。熱分解温度は 500°C を越えないように注意した。

回収ガス・油の成分及び物性を日本工業規格に基づきガスクロマトグラフ等により分析した。更に、回収油の分溜を試みた。回収油100mlを蒸留して蒸留曲線

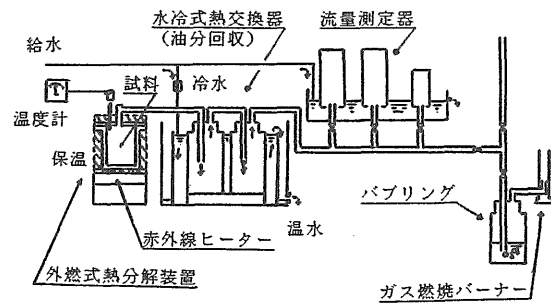


図-2 熱分解実験装置

を作成し、分溜ポイントを決めた後、回収油1,000mlを蒸留し、分溜ポイントに従って分溜物を採取してその成分及び物性を分析した。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 回収物質

試料を入れた炉を外部ヒーターで加熱したときの炉内温度を図-3に示すが、加熱開始約10分経過後から上昇し、熱分解ガスの発生が開始する。温度の上昇とともに回収ガスの量も増加し、炉内温度が約 275°C で回収ガス量はピークとなり、以後温度は上昇するが回収ガス量は減少する。約5時間後、 400°C を越えたところでヒーターをオフにした。発生したガスは水冷式熱交換器を通し一部油分として回収し、残りはガスとして回収する。炉内の残渣は実験終了後回収した。FRP

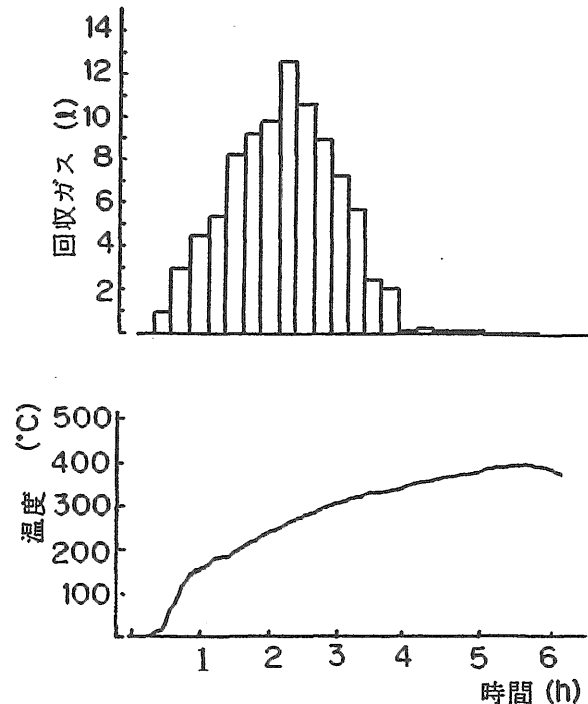


図-3 熱分解時の温度と回収ガス量

表-2 熱分解回収物質

| 成分 | ガス分(ℓ) | 油分(g) | 残渣(g) |
|-----|--------|-------|-------|
| 含有量 | 83.8 | 344 | 524 |

※残渣：ガラス繊維とカーボン

1,000gの熱分解時の回収量を表-2に示す。ガス90.7ℓ、油344g(34.4wt%)、分解残渣524g(52.4wt%)である。なお、水分は発生しなかった。熱分解に用いたFRPの樹脂含有率は60wt%であるので、樹脂からの油回収率は約55%となり、効率良く回収できることが判明した。FRPの分解残渣はガラス繊維とカーボンであり、今回のガラス繊維含有量は40wt%であるのでカーボンは12%と推算できる。

なお、回収パイプを長くして、パイプへの油分の付着を調査したが、熱分解ガス発生温度が低い場合、閉塞の原因となるような付着はみられなかった。

2.2.2 回収ガスの物性

回収したガスをガスクロマトグラフで分析した結果を表-3に示す。この成分組成をもとに、外部加熱による発生ガス量を求め、それに高位発熱量をかけて各成分の発熱量を求めたものを表-4に示す。それらを総て加えたこのガスの発熱量は8,939kcal/Nm³であった。比較のために代表的な気体燃料の発熱量を表-5に示す。これから明らかなように、この回収ガスの発熱量は天然ガスと同程度であり燃料として使用可能な熱量を持っている。しかし、得られた回収ガスには二酸化炭素が41.8%も含まれており、可燃性ガスは残りの60%弱しかない。従って、このまま燃料として利用

表-3 発生ガス成分分析結果 (%)

| 成分 | 酸素 | 窒素 | 水素 | メタン | CO | CO ₂ |
|-----|-------|------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 含有量 | 0.2 | 0.8 | 14.2 | 7.4 | 20.2 | 41.8 |
| 成分 | アセチレン | エチレン | エタン | C ₃ ~C ₅ | C ₆ ~C ₈ | 発熱量 |
| 含有量 | 0.05 | 3.6 | 3.9 | 3.9 | 1.1 | 8939 |

※発熱量 kcal/Nm³

表-4 発生ガス発熱量の計算結果

| | 総量 | O ₂ | N ₂ | H ₂ | CH ₄ | CO | CO ₂ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₆ H ₆ | その他 |
|---|------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|
| 成分組成(%) | 100 | 0.2 | 0.8 | 14.2 | 7.4 | 20.2 | 41.8 | 0.05 | 3.6 | 3.9 | 3.9 | 1.1 | 2.85 |
| 発生ガス量(10 ⁻³ Nm ³ /kg) | 9070 | 18 | 73 | 1288 | 671 | 1832 | 3791 | 5 | 326 | 354 | 353 | 100 | 258 |
| 高位発熱量(kcal/Nm ³) | - | - | - | 3050 | 9520 | 3020 | - | 14090 | 15290 | 16820 | 24320 | 34960 | 163000 |
| 発生ガス発熱量(kcal/Nm ³) | 8939 | - | - | 433 | 704 | 610 | - | 7 | 550 | 656 | 948 | 385 | 4646 |

表-5 気体燃料の発熱量

| ガスの種類 | 原料 | 高位発熱量 kcal/Nm ³ |
|--------|------|-------------------------------|
| コークスガス | 石炭 | 6,270 |
| 発生炉ガス | コークス | 1,160 |
| 水生ガス | コークス | 2,830 |
| 天然ガス | 新潟 | 9,000 |
| 都市ガス | 東京ガス | 11,000 |

するには熱効率が悪く、回収ガスの有効利用を図るため二酸化炭素を分離することが有効である。分離により約35%の一酸化炭素を主成分とする可燃性ガスとなり十分利用出来る。二酸化炭素を分離後のガスは一酸化炭素、水素を主成分とする可燃性ガスであり、発熱量が低い難点はあるがガスエンジン等に使用可能である。しかし、発火温度の高い一酸化炭素(発火温度651℃)と水素(585℃)がこのガスの主成分であるため、粗製のままでディーゼルエンジンへの使用には難がある。

2.2.3 回収油の物性

回収油の物性分析結果を表-6に示す。また、比較のため、日本工業規格による軽油及び重油の物性を表-7に示す。この回収油を石油系燃料と比較すると以下の特徴がある。

- (1) 粘性は重ナフサに相当している。
熱分解温度が400℃程度でもかなり粘性が高い。温度が上がるとさらに粘性が増すため、500℃以上の熱分解油では回収パイプの閉塞を起こす可能性が高い。
- (2) 引火点はガソリンに近く、引火性が強い。
引火点が零度以下であることは軽質の溜分を含んでいることを意味し、ベーパーロックや異常燃焼の原因に成りやすい。
- (3) 流動点や残炭は石油系とは異なった傾向値を示している。
- (4) 炭素と水素の比率は約10:1でA重油の6:1に比べて炭素が多く、燃焼に際し石油系よりも必要空

表-6 回収油の物性分析結果

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|---------------|------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 比重 15℃ | 反応 | 引火点 ℃ | 動粘度 50℃cst | 流動点 ℃ | 総発熱量 kcal/kg | | | |
| 0.9556 | 酸性 | -0.5 | 0.966 | <-65 | 9240 | | | |
| 酸値 wt% | 灰分 wt% | 水分 wt% | 硫黄分 wt% | 水素分 wt% | 炭素 wt% | 酸素 wt% | 窒素 wt% | 塩素 wt% |
| 1.12 | 0.01 | 0.60 | 0.10 | 0.30 | 75.6 | 7.2 | 0.08 | 0.10 |

表-7 軽油及び重油の物性 (日本工業規格)

| 種類 | 反応 | 引火点 ℃ | 動粘度 30℃cst | 流動点 ℃ | 硫黄分 wt% | |
|----|------|----------|---------------|----------|------------|--------|
| 軽油 | 1号 | 中性 | 50以上 | 2.7以上 | -5以下 | 1.20以下 |
| | 特3号 | 中性 | 50以上 | 1.8以上 | -30以下 | 1.00以下 |
| 重油 | 1種1号 | 中性 | 60以上 | 20以下 | 5以下 | 0.5以下 |
| | 3種1号 | 中性 | 70以上 | 400以下 | - | - |

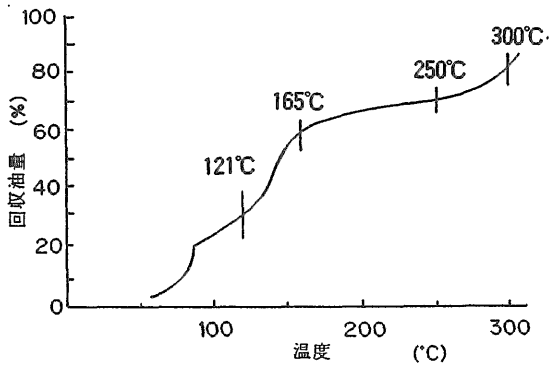


図-4 蒸留曲線

表-9 分溜油の物性分析結果

| 物性 | 分溜量 温度 | 0~30% 50~121℃ | 30~60% 121~170℃ | 60~75% 170~250℃ | 残り 250℃~ |
|-----------------|-----------|------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| 比重 (15/4℃) | | 0.896 | 0.9049 | 1.0249 | 1.1181 |
| 反応 | | 酸性 | 酸性 | 酸性 | 酸性 |
| 引火点 | | -11.0 | 18.0 | 45.5 | 144 |
| 動粘度 40℃cst | | 0.537 | 0.698 | | |
| 流動点 ℃ | | <-60.0 | -50.0 | -10.0 | |
| 総発熱量 kcal/kg | | 10,250 | 9,590 | 8,530 | 8,650 |
| 水分 wt% | | 15.3 | 2.26 | 0.65 | 0.13 |
| 硫黄分 wt% | | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| 塩素分 wt% | | 0.01 | 0.02 | 0.01 | < 0.01 |
| 炭素 wt% | | | 78.7 | 80.7 | 79.3 |
| 水素 wt% | | | 7.8 | 7.2 | 6.0 |
| 窒素 wt% | | | < 0.1 | < 0.1 | < 0.1 |

気量が多くなり、燃焼方式等の改善が必要になる可能性がある。

(5) 極めて酸性が強いため、ライナー、ピストン、軸受け等の腐食の原因となりうる。

しかし、硫黄分の含有量は0.10wt%程度と少なくエンジンの低回転・低出力時の硫酸腐食に関しては有利である。

(6) 石油系燃料の着火性の尺度としてCCAI'(calculated carbon aromaticity index)があり、次式から求めることが出来る。

$$CCAI' = D - 141 \log \log (V_k + C) - 81$$

ここで D : 密度 kg/m³ at 15℃

V_k : 粘度 cst at 15℃

C : 常数 (A重油 0.3、重質重油 0.85)

CCAI' はセタン価と相関性があり、セタン指数とは逆に小さい程着火遅れが少ないことを意味する。計算の結果、回収油のCCAI'は957 (A重油 870~810)で、着火性が悪いことが予想され、起動困難、ディーゼルノック、排煙濃度の増加、あるいは燃焼室内炭素状堆積物の増加を起こす可能性が考えられる。

更に、詳細な組成分析を行った。含有量が多い37種類の分子構造を表-8に示すが、回収油はアセトンからアントラセン、テレフェニールあたりまでと通常の油より広範囲の化合物で構成され、酸性の要因は含有している硫黄化合物であると推定される。また、オクタン価の大きい芳香族の化合物を多く含有しており、酸性の点を除けば、他の油と混合することにより内燃機関の燃料として使用できる可能性がある。

以上のように今回の回収油については種々の問題があることが判明したが、この回収油は熱分解直後の粗製のものであり、これに分溜・化学処理等の種々の工程を加えると性状を改善することが可能である。そこで、分溜を試みた。蒸留曲線を図-4に示す。前述のように回収油は広範囲の化合物が含有しているが、同図より明らかなように沸点範囲は偏在しており80-170℃で60%が溜出する。今回の分溜ポイントは便宜的に溜出量により決めた：溜出量0-30% (50-121℃)、30-60% (121-170℃)、60-75% (170-250℃)、75-100% (250℃以上) 各分溜油の成分及び物性分析結果を表-9に示す。分溜することにより引火点が高い油を回収

表-8 回収油の成分物質

| 整理番号 | 名 前 | 分子量 | 構造 | 整理番号 | 名 前 | 分子量 | 構造 | 整理番号 | 名 前 | 分子量 | 構造 |
|------|---------------------------------|-----|---|------|------------------------------|-----|----|------|--|-----|----|
| 1 | Acetone | 58 | | 10 | Benzen, 2-propenyle | 118 | | 18 | Benzoic acid | 122 | |
| 2 | 2-propen-1-ol | 58 | $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH}$ | | Benzen 1-etyenyl-2-methyle | 118 | | 19 | Naphthalene, 2-methyl- | 142 | |
| 3 | Benzen | 78 | | 10' | Benzaldehyde | 106 | | 20 | Naphthalene, 1-methyl- | 142 | |
| 4 | 1.3-Dioxolane | 102 | | 11 | Benzen, propyl | 120 | | 21 | 1.1'-Biphenyl | 154 | |
| 5 | Toluen | 92 | | 12 | Carbamic acid, phenyle ester | 137 | | 22 | Benzen dicarboxylic acid, dimethyl ester | 194 | |
| 6 | 1.3-Dioxolane 2-ethyl-4-methyl- | 116 | | 13 | Benzen, 1-propyl | 118 | | 23 | 1.1-Biphenyl, 2-methyl | 168 | |
| 7 | Xylene Benzene, ethyl | 106 | | 14 | 1H-Indene, 2.3-dihydro | 118 | | 24 | Bi-2.4.6-cycloheptatrien-1-ry | 182 | |
| 8 | Bycyclo4.2.0-octa-13.5-trien | 104 | | 15 | Benzen, 1-propyl | 116 | | 25 | Benzen. 1.1-(diazomethylene) bis | 194 | |
| | 1.3.5.7-Cyclooctatetraen | 104 | | 16 | Ethanone, 1-phenyl | 120 | | 26 | Benzen. 1.1-(1.3-propanediyl) bis | 196 | |
| 9 | Benzen(1-methylcthyle) | 120 | | 17 | Naphthalene | 128 | | 27 | Benzen. 1.1-(1.2-dibromo-1.2-ethanediyl)bis | 338 | |
| | | | | | | | | 28 | Benzen. 1.1-(3-methyl-1-propane-1.3-diyl)bis | 208 | |
| | | | | | | | | 29 | Benzen. 1.1-(3-methyl-1-propane-1.3-diyl)bis | 208 | |
| | | | | | | | | 30 | Phenanthrene | 178 | |
| | | | | | | | | 31 | Anthracene | 178 | |
| | | | | | | | | 32 | 1H-Indene, 1-(phenyl-methyl)- | 204 | |
| | | | | | | | | 33 | Phenanthrene, methyl- | 192 | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 34 | Naphthalene, 2-phenyl | 204 | |
| | | | | | | | | 35 | Naphthalene, (2-phenyl-methyl)- | 218 | |
| | | | | | | | | 36 | 1-Butanone, 2-methyl 1-phenyl | 162 | |
| | | | | | | | | 37 | Terphenyl | 230 | |

出来る。また、総発熱量も170℃以下では9,000kcal/kgを越える等、分溜により物性が変化する。今回の分溜ポイントは回収重量を目安に便宜的に決めたが、詳細な物性を重視した検討を行えば効率的な分溜が可能である。分溜によっても反応は酸性ではあるが、その原因が硫黄化合物であると推定できるので、化学処理により中和出来る。

2.3 熱分解回収油を燃料とする洋上処理システムの提案

2.3.1 廃FRP船処分問題の背景

廃FRP船の処理を円滑に遂行するためには、それに係わる経費を無視することはできない。処理に関する経費は、解体等前処理を含む処分経費及び廃船の輸送経費である。公表データによるそれぞれの経費計算の一例を各々表-10³⁾(参考:各要素平均処理経費図-1)及び表11⁵⁾に示す。これらから明らかなように、廃棄処分する場合の負担は非常に大きい。

また、現在の廃棄物の最終処分の主流は埋立であるが、各種公害の発生の危惧からの住民の反対で最終処

表-10 FRP漁船の廃棄処理費用

| | | | |
|-------|----------|---------------------|-------|
| 処理船概要 | 隻数/FRP重量 | 3隻、5.98トン | |
| | L×B×D(m) | 12.65 × 2.77 × 0.89 | 6.9トン |
| | と総トン数 | 11.50 × 2.77 × 0.80 | 6.9トン |
| | | 12.00 × 2.80 × 0.80 | 6.9トン |

| 経費 | 作業内容 | 内訳 | 数量 | 単価(円) | 合価(円) |
|-------|--------|------------|---------|---------|---------|
| | 解体 | 建設機械使用料 | 1台2日 | 132,000 | 264,000 |
| 1式 | | | 126,000 | 126,000 | |
| 解体物運搬 | | 解体物積込用ローダ | 1式 | 41,600 | 41,600 |
| | | トラック(10トン) | 6台 | 30,000 | 180,000 |
| 破碎 | 破碎機使用料 | 2日 | 50,000 | 100,000 | |
| | | 人件費 | 4人日 | 15,000 | 60,000 |
| 破碎物運搬 | トラック | 5.98ト | 3,600 | 21,528 | |
| | | 埋立 | 埋め立て料金 | 5.98ト | 12,000 |
| 管理費 | | | 10% | 87,900 | |
| 合計 | | | | 952,788 | |

表-11 FRP船輸送経費見積り例

| | | |
|------|--------|-----------------------|
| 輸送概要 | 輸送距離 | 650km |
| | 輸送FRP船 | 1隻 L×B×D(m): 15×3.5×2 |

| 経費 | 車両 | 内容 | 数量 | 単価(円) | 合価(円) |
|---------|----------|---------|--------|--------|---------|
| | 25トントレーラ | | 使用基本料金 | 1台 | 220,870 |
| 割増金 特大品 | | | 13割 | | 287,131 |
| 割増金 深夜 | | | 3割 | | 66,261 |
| 車両留置料金 | | | 15囀 | 6,520 | 97,800 |
| 先導車 | | 使用基本料金 | 1台 | 63,480 | 63,480 |
| | | 割増金 特大品 | 3割 | | 19,044 |
| | | 車両留置料金 | 15囀 | 2,060 | 30,900 |
| 合計 | | | | | 885,468 |

分場を確保できないという問題も生じている。

2.3.2 洋上処理システムの提案

2.3.2.1 洋上処理システムの概要

経費負担を少しでも軽減するために、廃FRP船の熱分解処理工場を船上に造り、回収油を船舶の推進エネルギーとする洋上処理システムを提案する。以下にその概要を示す。

- (1) 廃船は全国各地に設置した廃船ヤードであるバージに船主が積載・投棄する。
- (2) 輸送経費を軽減するために熱分解炉をサイドスラスタ付きピンジョイント船(図-5)に搭載する。

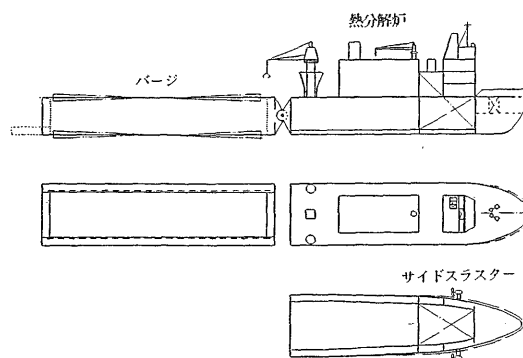


図-5 洋上処理ピンジョイント船

- (3) 各地の基地を回ってバージを入れ替え廃船を回収し、洋上にて廃船を処理する。
- (4) 解体経費を軽減するため、廃船を有姿のまま熱分解する。(収容能力 長さ:40m 幅7m程度)

解体、破碎等の前処理費用を軽減するため、廃FRP船の解体・破碎・細片化を行わず、出来るだけ大きな状態-出来れば有姿状態-で熱分解できる炉(図-6)とする。炉に入らない特大の船の場合は、酸素ランスあるいは爆薬により投入可能な寸法に切断⁴⁾する。

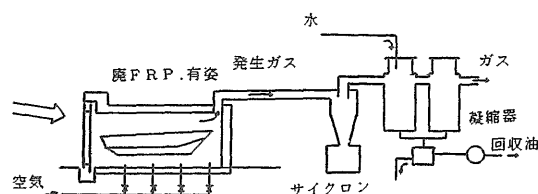
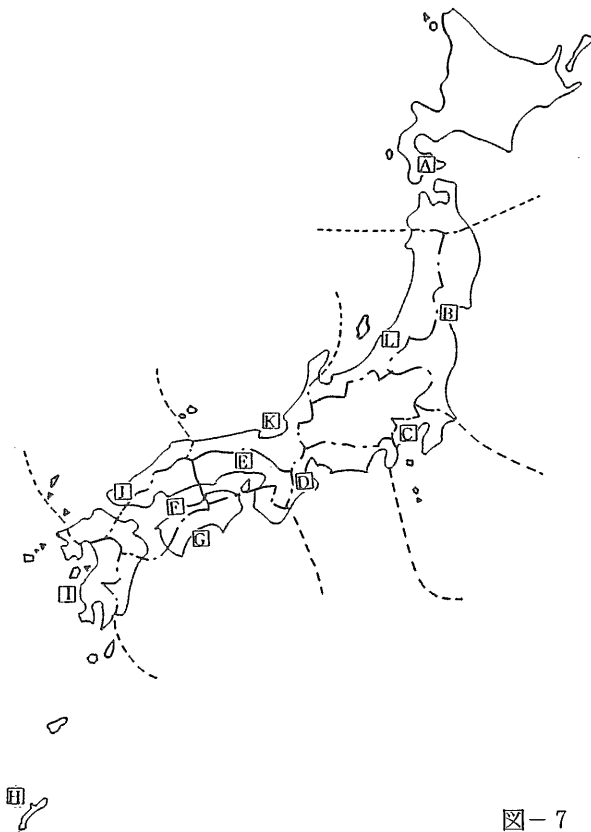


図-6 有姿処理熱分解装置

- (5) 分解によりかなり高いエネルギーを有する油が回収できる。ガラス繊維は残渣として回収する。
- (6) 船舶の運航エネルギーは廃FRP船の熱分解により得た油を利用する。



| 廃船ヤード 場所 | 廃船数 (隻) | 廃FRP量 (トン) | 隣接ヤード への距離(km) |
|-------------|------------|---------------|-------------------|
| A | 4,000 | 2,000 | 500 |
| B | 3,500 | 1,700 | 500 |
| C | 4,500 | 2,250 | 400 |
| D | 4,000 | 2,000 | 500 |
| E | 3,000 | 1,500 | 400 |
| F | 3,000 | 1,500 | 400 |
| G | 2,000 | 1,000 | 900 |
| H | 1,000 | 500 | 600 |
| I | 4,000 | 2,000 | 600 |
| J | 3,000 | 1,500 | 600 |
| K | 2,500 | 1,250 | 500 |
| L | 2,000 | 1,000 | 500 |
| 合計 | 36,500 | 18,250 | 6,400 |

図-7 廃船留置ヤード設置案

FRPの熱分解回収油は、発熱量が高いという利点がある反面、酸性であるなどの欠点をもっているため内燃機関に使うには問題がある。従って、当システムでは、熱分解回収油を燃料として蒸気を生成し、その蒸気でターボ発電を行う。得た電力でモータを回しサイドスラスターで船舶を推進する。航行速度は8ノット程度の低速とする。

船上でリサイクルを行う利点は以下のとおりである。

- (1) 樹脂分のサーマルリサイクルにより輸送費用を軽減できる。
- (2) 海上で処理するので、悪臭及び騒音に関する公害は問題が起きない。
- (3) 住民の反対することが多い最終処理場問題がない。
- (4) 工場用敷地を必要とせず、広い甲板を廃棄物の置場として利用出来るため、土地のない日本では有利になる。

2.3.2.2 洋上処理船の運航例

各廃船ヤードを全て回ると1週の航行距離は図-7に示すように約6400kmになる。航行速度を8ノットとすると連続航行で1週に19日を要する。また、サイドスラスターで8ノットの速度を得るために必要な推進モータ出力は3600ps⁶⁾である。

日本国内で発生する廃FRP船の予測数は2000年度については36,500隻でFRP重量で18250トンである。³⁾ これらを3回の配船ですべて処理をすると仮定すると、1回の処理量は約6,080トンとなる。航行中のみ熱分解処理を行うとすると、1回19日での処理であるので、時間当たりの処理量は13.3トンとなる。FRP試験片での熱分解油回収率は34.4%であるが、有姿のままの熱分解のためロスを見込み、油回収率を20%と見積ると、油回収量は2.66トンとなる。

以上の熱分解油で蒸気を発生し、ターボ発電機を回した場合の推進モータ出力を計算する。

蒸気発生量 G_x は次式で求められる。なお、回収油の熱量は表-6に示すように9,240kcal/kgであるが、以下の計算では、8,500kcal/kgと低めの値とした。

$$G_x = (F_{oc} \times L_{cv} \times \eta_b) / (t - t_0) = 27,301.9 \text{ kg/h}$$

ここで G_x : 蒸気発生量

F_{oc} : 油回収量 2,600kg/h

t : 蒸気のエンタルピー 667.1kcal/kg

t_0 : 供給水のエンタルピー 60kcal/kg

L_{cv} : 単位発生熱量 8,500kcal/kg

η_b : 変換効率 0.75

従って、ターボ発電機の出力 P_o (kw) は、次式で求めることができる。

表-12 廃タイヤ熱分解回収物物性

| ガス | N ₂ | O ₂ | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | その他 |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| (%) | 53.1 | 1.5 | 8.3 | 10.0 | 6.9 | 5.3 | 2.9 | 1.1 | 0.5 | 10.4 |
| 油 | 比重 | | 反応 | 硫黄(w/w%) | 灰分(w/w%) | | 総発熱量(kcal/kg) | | | |
| | 0.94~0.98 | | 中性 | 0.5~1.4 | 0.1~0.5 | | 7,900 | | | |

$$Po(kw) = 27,301.9(kg/h) / 8(kg/kg \cdot h) = 3,412kw$$

出力3,412kwのうち船舶の推進に3,000kwが使い、効率を0.95と仮定すると、推進モータ出力 $P\mu$ は、以下ようになる。

$$P\mu = 3,000kw \times 0.95 = 2,850kw = 3,876ps$$

この出力は8ノットの航行に必要な3,600psを越えている。更に、熱分解時に発生するガスも使用可能であるので、熱分解により得られたエネルギーのみで十分航行できる。

しかしながら、廃FRP船の供給量が予測以下の場合も有り得る。廃船の供給が不足の場合には、船以外のFRP（FRP製造量の90%以上を占める：表-1）や廃タイヤ等の利用をすれば良い。廃タイヤ利用は①熱分解により表-12⁷⁾に示す良質の油・ガスが回収出来ること、②その廃棄処理に困って使用者が処理費用を払っていること、③廃棄量の予測が立てやすいこと、及び④現実の問題になっている廃タイヤ保管場所に広い甲板を利用できる、といった当システムに適した特徴がある。

2.4 まとめ

FRPを構成している樹脂分（不飽和ポリエステル）の低温熱分解を試みた。回収油の粘性が大きくなったが、パイプの閉塞の問題が生じるほどではなかった。従って、熱分解により油を回収する技術の実用化のためには、低温熱分解が有効であると考えられる。その他、以下のことが明らかになった。

- (1) ガス・油が効率良く回収できる。（長所）
- (2) 燃料として十分な発熱量を持つ。（長所）
- (3) 酸性が強い。（短所）
- (4) 引火点が零度以下である。（短所）
- (5) 着火性が悪いと推定される。（短所）

結局、物性に欠点をもつものの高い熱量をもつ油を比較的効率よく回収できることが判明し、内燃機関以外での燃料としての利用は十分可能でサーマルリサイクルへの道を開いた。

また、この回収油を粗製のまま燃料とする洋上処理システムを提案した。なお、廃船ヤードの設置については海岸線の管理者（国の各機関、地方自治体、漁業組

合等）の理解と協力が不可欠である。

3 熱処理残渣の溶融固化物の物性の調査

この章では、熱処理残渣のガラス繊維を溶融・冷却固化して石塊状にした物（以下、溶融固化物という）のより高度な用途（吸着材、水質浄化材、土壌改良材等への再利用）を開発するため行った成分及び物性調査の結果について述べる。

なお、この研究は(財)日本船用機器開発協会・けいはんな環境(株)からの受託試験として実施した。

3.1 実験

3.1.1 供試材料

溶融固化に用いた材料は廃FRP船の熱処理残渣（以下廃船残渣）及びガラス繊維である。廃船残渣は実際の廃FRP船を400~500℃で熱処理してFRPの樹脂成分を処理した際に回収した残渣である。白色のガラス繊維に多少の黒色のチャーが混在しており、ふんわりとした状態である。船に用いられているFRPは図-8に示す構成であり、樹脂には熱硬化性樹脂の不飽和ポリエステルを用い、強化のために2種類の織り方のガラス繊維—チョップドストランドマット(M)及びロービングクロス(R)—を交互に積層したMR構成となっている。ガラス繊維と樹脂の重量比は4:6である。実船のFRPには塗料が塗布してあり、廃

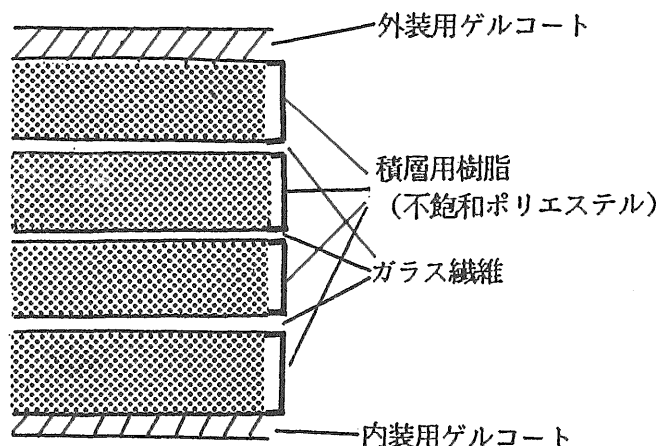


図-8 FRPの構成

船残渣には成分未定の塗料等の不燃成分が混在する。

本実験に使用したガラス繊維は旭ファイバークラス製ガラス繊維のM及びRで船用に用いられるEガラスを出荷状態で使用した。ガラス繊維の出荷時のメーカーによる組成を表-13に示す。通常、ガラス繊維には、表-14に示す紡糸集束剤 (MとR) やマット結合剤 (Mのみ) が使用されている。しかし、これらは燃焼により簡単に灰化し極めて微量な灰分となる。ガラス繊維はロール状態で購入し、20cm角に切断し使用した。使用したガラス繊維の熔融温度は830°Cである。

表-13 ガラス繊維の組成

| | | | | |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | B ₂ O ₃ |
| 54.99 | 13.91 | 0.22 | 0.15 | 6.15 |
| CaO | MgO | Na ₂ O | F ₂ | Cr ₂ O ₃ |
| 22.74 | 0.50 | 0.43 | 0.5 | 0.006 |

表-14 ガラス繊維の集束剤・結合剤

| | チョップドストランドマット | ロービングクロス |
|--------|---|--|
| 紡糸集束剤 | シラン処理 集束性保持剤 ポリ酢酸ビニール主体 繊維油剤 カチオン系 付着量 0.45% | シラン処理 集束性保持剤 エポキシ主体 繊維油剤 カチオン系 付着量 0.5% |
| マット結合剤 | ビスフェノール系ポリエステル粉末 付着量 3.5% | 未使用 |

3.1.2 実験装置

熔融固化実験に用いた装置はけいはんな環境(株)のロータリーキルンである。その主要目を表-15に、概略図

表-15 ロータリーキルン主要目

| | | |
|--------|--------------------------------|---|
| 炉型式 | 二段式ロータリーキルン | |
| 処理能力 | 約30kg/h | |
| 最高使用温度 | 1次燃焼室 1,300°C 2次燃焼室 1,000°C | |
| 主要寸法 | 1次燃焼室 (回転式) | 内径 400φ 外径 600φ 長さ 3m 耐火材 厚さ 100mm 材質 耐火キャストブル |
| | 2次燃焼室 (非回転式) | 内径 500φ 外径 600φ 長さ 3m 耐火材 厚さ 50mm 材質 セラミックファイバー |

を図-9に示す。熔融は1次燃焼室で実施した。1次燃焼室は内径400φ、長さ3mの円筒状の炉で回転機能をもっており、排出口近くにダムを設けてある。加熱は下段バーナーで行い、炉内温度は図-9に示す位置でCA熱電対で計測した。

3.1.3 実験方法

ロータリーキルンで試料を各種処理条件 (温度及び滞留時間) で熔融した後、冷却・固化し回収した。まず、ロータリーキルンの1次燃焼室内を灯油バーナーにより加熱、所定の温度に達したところで試料0.8~2.5kgを投入口より投入し、炉を回転 (回転速度2rpm)

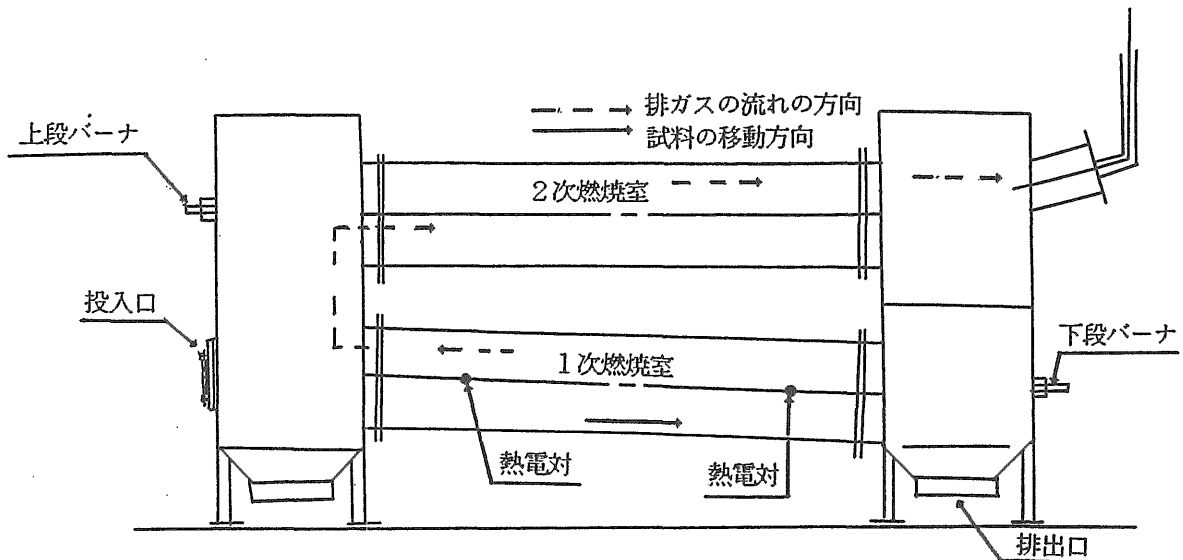


図-9 ロータリーキルン

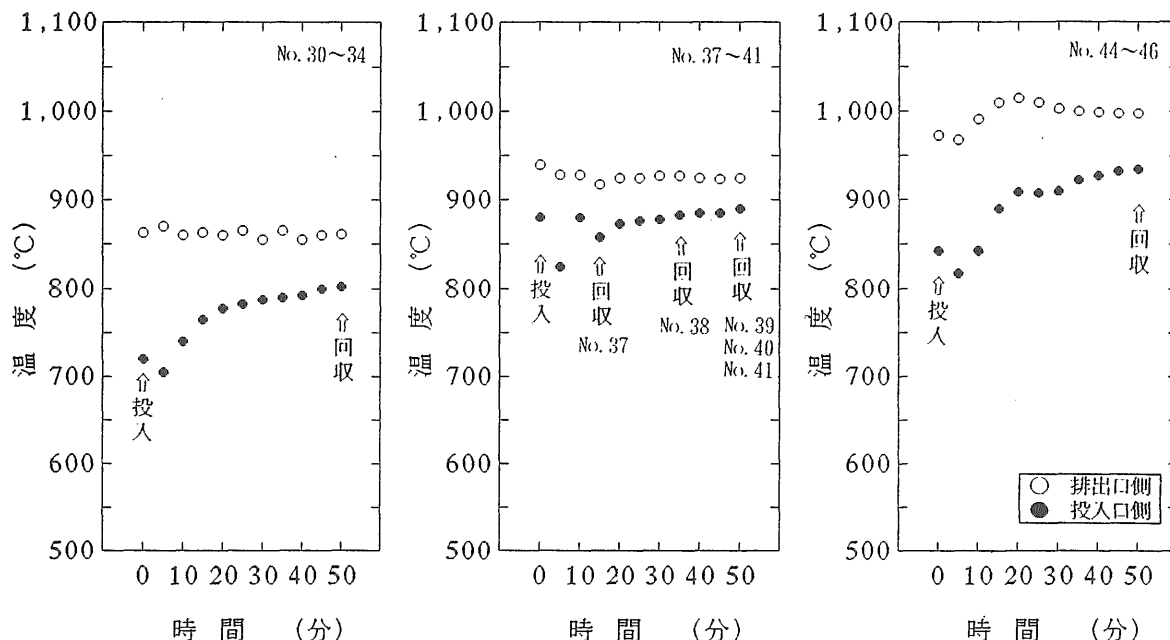


図-10 ロータリーキルン炉内温度測定例

した。試料は廃船残渣及びガラス繊維のRのみ、Mのみ、と(M+R)の4種類である。投入した試料は時間の経過とともに加熱され、炉の回転と傾斜により排出口に向かって移動する。試料は徐々に高温化して溶融し回転により筒状を形成しながら、排出口手前のダムに達する。炉内温度の測定例を図-10に示す。ダムで滞留した状態で予定した時間まで経過すると、バーナーを消火し、炉の回転を止め、溶融した残渣を取り出し、各冷却方法(水冷・空冷・炉冷)に併せて冷却した。予定時間前にダムを乗り越えた試料は自動的に水を満たした排出トレイに落下し水冷固化する。空冷とは大気温度での自然冷却、また、炉冷とはロータリーキルン内での自然冷却である。

3.1.4 分析方法

実験により得られた溶融固化物の成分分析及び比重、気孔等の物性調査を行った。なお、表-16~表-18に示すNo.26の試料は今回の実験に用いた廃船残渣を他のロータリーキルンにて溶融・冷却固化したものである。

成分分析は蛍光X線法による含有元素の定性分析と、リサイクル製品の物性に含有量が大きく関与すると考えられるSiO₂、Al₂O₃、Na₂O並びに付加価値のあるホウ素Bについての定量分析を実施した。蛍光分析条件は測定電圧40Kv、電流40mAである。なお、蛍光分析の特性からBのような軽い元素は検出できないため、Bの定量分析は、X線分析法(分析条件電圧10Kv)により行った。

物性分析はJIS R 2205 “耐火れんがの見掛気孔率・吸水率及び比重の測定方法”により見掛気孔率(P0)、吸水率(Aw)、見掛比重(Da)及びかさ比重(Db)を測定した。

計算方法は以下のとおりである。

$$P0 (\%) = (W3 - W1) / (W3 - W2) \times 100$$

$$Aw (\%) = (W3 - W1) / W1 \times 100$$

$$Da (\%) = W1 / (W1 - W2) \times 100$$

$$Db (\%) = W1 / (W3 - W2) \times 100$$

ここで

W1 : 乾燥重量 (試料を105~120°Cの恒温器中で乾燥し、恒量に達した時の重量)

W2 : 飽水試料の水中重量 (試料を煮沸槽の水面下に沈め、3時間以上煮沸し、室温まで冷却した時の水中での重量)

W3 : 飽水試料の重量 (飽水試料を水中から取り出し、水滴を除去した時の重量)

3.2 結果及び考察

3.2.1 外観観察結果

溶融固化物の外観形状について観察した結果、以下のことが判明した。

(1) 形状、色状等

- 黒色のガラス繊維が多く残る。巣が多い：
 廃船残渣(試料No.4)、R+M(No.8)、M(No.12、35、36)

未溶融のガラス繊維は、取り扱い上や増量材として利用する場合は取り扱い等が面倒なので再処

表-16 蛍光分析結果

| 番号 | 試料種類 | 温度 ℃ | 滞留 時間 | 冷却 方法 | X線の量 CPS | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|---------|----------|----------|----------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | | C | Mg | K | Cr | Fe | Cu | Zn | Sr | S | P | Ti | Al | Si | Ca |
| 42 | 廃 | 800 | 50分 | 水冷 | 0.6 | 1.4 | 6.2 | 1.3 | 4.1 | 0.6 | 1.2 | 10.7 | 1.3 | 0.6 | 0.3 | 130 | 274 | 345 |
| 43 | | 800 | 50分 | 空冷 | 0.6 | 1.2 | 7.7 | 1.3 | 4.4 | 0.6 | 0.9 | 10.7 | 1.5 | 0.7 | 0.3 | 130 | 275 | 359 |
| 27 | | 850 | 50分 | 水冷 | 0.9 | 5.1 | 7.0 | 1.3 | 9.3 | 0.9 | 2.0 | 10.8 | 1.3 | 1.2 | 0.2 | 130 | 321 | 323 |
| 29 | | 850 | 50分 | 空冷 | 0.7 | 4.5 | 6.9 | 1.2 | 4.2 | 0.9 | 1.9 | 12.2 | 1.1 | 0.7 | 0.2 | 130 | 320 | 323 |
| 28 | | 850 | 50分 | 水冷 | 0.7 | 4.5 | 7.4 | 1.3 | 6.7 | 1.4 | 6.0 | 10.2 | 1.7 | 1.7 | 0.4 | 130 | 317 | 326 |
| 30 | | 860 | 50分 | 水冷 | 2.7 | 4.2 | 12.4 | 1.4 | 12.2 | 1.8 | 3.2 | 8.1 | 3.9 | 2.3 | 0.7 | 117 | 318 | 304 |
| 31 | | 860 | 50分 | 空冷 | 1.2 | 5.3 | 6.6 | 1.3 | 6.6 | 1.3 | 1.4 | 8.3 | 1.7 | 1.2 | 0.3 | 128 | 320 | 311 |
| 32 | | 860 | 50分 | 水冷 | 1.0 | 3.6 | 6.3 | 1.4 | 7.0 | 1.6 | 2.9 | 9.2 | 2.5 | 1.3 | 0.4 | 129 | 316 | 332 |
| 33 | | 860 | 50分 | 空冷 | 1.0 | 2.6 | 8.1 | 1.5 | 10.1 | 1.5 | 1.6 | 9.1 | 2.7 | 1.7 | 0.8 | 126 | 314 | 326 |
| 34 | | 860 | 50分 | 炉冷 | 1.1 | 3.0 | 9.1 | 1.4 | 10.2 | 2.4 | 3.3 | 10.1 | 4.3 | 2.0 | 0.7 | 123 | 314 | 320 |
| 2 | 船 | 880 | 14分 | 水冷 | 1.7 | 5.6 | 7.8 | 1.3 | 9.0 | 8.0 | 6.8 | 8.7 | | | | 122 | 301 | 313 |
| 3 | | 880 | 25分 | 水冷 | 2.7 | 6.7 | 9.0 | 1.3 | 10.9 | 4.5 | 4.7 | 7.8 | | | | 120 | 293 | 290 |
| 1 | | 880 | 28分 | 水冷 | 1.6 | 1.1 | 6.8 | 1.2 | 5.6 | 1.7 | 3.6 | 8.4 | | | | 122 | 300 | 311 |
| 37 | | 930 | 15分 | 水冷 | 1.2 | 1.6 | 7.7 | 1.3 | 6.9 | 1.1 | 1.4 | 9.9 | 2.2 | 0.9 | 0.5 | 134 | 316 | 334 |
| 38 | | 930 | 35分 | 水冷 | 0.6 | 1.6 | 7.4 | 1.4 | 6.6 | 0.7 | 1.4 | 9.9 | 1.1 | 0.8 | 0.6 | 137 | 315 | 335 |
| 39 | | 930 | 50分 | 水冷 | 0.7 | 2.2 | 8.0 | 1.4 | 8.7 | 1.1 | 1.8 | 9.1 | 1.6 | 1.0 | 0.6 | | 313 | 333 |
| 40 | | 930 | 50分 | 空冷 | 0.6 | 2.0 | 8.3 | 1.4 | 8.7 | 1.7 | 2.1 | 9.4 | 1.4 | 0.9 | 0.4 | 140 | 279 | 334 |
| 41 | | 930 | 50分 | 炉冷 | 0.6 | 2.1 | 8.0 | 1.3 | 8.6 | 1.1 | 1.7 | 8.7 | 1.5 | 0.9 | 0.6 | 138 | 277 | 332 |
| 4 | | 940 | 43分 | 水冷 | 3.4 | 5.7 | 8.3 | 1.3 | 11.8 | 6.3 | 15.4 | 7.1 | | | | 127 | 291 | 298 |
| 44 | | 1000 | 50分 | 水冷 | 0.7 | 2.1 | 10.9 | 1.5 | 9.6 | 0.8 | 1.4 | 9.2 | 1.2 | 0.8 | 0.4 | 152 | 275 | 327 |
| 45 | 1000 | 50分 | 空冷 | 0.5 | 1.9 | 9.4 | 1.4 | 8.1 | 0.8 | 1.6 | 9.7 | 1.3 | 0.6 | 1.0 | 146 | 273 | 333 | |
| 46 | 1000 | 50分 | 炉冷 | 0.5 | 2.0 | 10.7 | 1.5 | 8.0 | 1.1 | 1.7 | 9.7 | 1.3 | 0.6 | 0.3 | 150 | 272 | 330 | |
| 26 | | 他のキルン炉 | | | 0.9 | 4.0 | 15.9 | 1.3 | 11.1 | 0.8 | 0.9 | 9.6 | | | | 182 | 291 | 285 |
| 19 | R + M | 775 | 30分 | 空冷 | 0.9 | 1.2 | 5.9 | 1.2 | 2.8 | 0.1 | 0.3 | 12.1 | | | | 127 | 304 | 358 |
| 15 | | 810 | 48分 | 水冷 | 0.9 | 1.1 | 5.7 | 1.2 | 2.6 | 0.1 | 0.3 | 12.1 | | | | 124 | 319 | 357 |
| 18 | | 810 | 55分 | 空冷 | 0.9 | 1.1 | 6.0 | 1.2 | 2.5 | 0.1 | 0.3 | 12.1 | | | | 125 | 303 | 359 |
| 16 | | 850 | 8分 | 水冷 | 1.1 | 1.1 | 5.5 | 1.2 | 2.4 | 0.1 | 0.3 | 12.1 | | | | 126 | 298 | 358 |
| 23 | | 925 | 21分 | 水冷 | 1.0 | 1.2 | 5.9 | 1.2 | 2.6 | 0.1 | 0.3 | 12.4 | | | | 127 | 302 | 357 |
| 24 | | 925 | 40分 | 空冷 | 0.9 | 1.4 | 6.8 | 1.2 | 3.4 | 0.1 | 0.3 | 12.4 | | | | 131 | 303 | 354 |
| 8 | | 930 | 30分 | 水冷 | 1.4 | 1.1 | 6.0 | 1.2 | 2.2 | 0.1 | 0.3 | 12.4 | | | | 127 | 300 | 358 |
| 9 | | 930 | 30分 | 空冷 | 0.8 | 1.4 | 8.0 | 1.3 | 3.1 | 0.1 | 0.4 | 12.5 | | | | 136 | 308 | 352 |
| 10 | | 930 | 30分 | 炉冷 | 0.7 | 1.3 | 7.2 | 1.2 | 2.9 | 0.1 | 0.4 | 12.1 | | | | 134 | 308 | 356 |
| 5 | | 940 | 90分 | 水冷 | 0.7 | 1.6 | 8.4 | 1.3 | 4.2 | 0.3 | 0.4 | 12.5 | | | | 138 | 298 | 350 |
| 7 | 940 | 90分 | 空冷 | 0.7 | 1.6 | 8.7 | 1.2 | 3.6 | 0.3 | 0.4 | 12.1 | | | | 139 | 306 | 347 | |
| 6 | 940 | 90分 | 炉冷 | 0.9 | 1.8 | 8.9 | 1.3 | 4.0 | 0.1 | 0.4 | 12.4 | | | | 140 | 307 | 346 | |
| 13 | M | 825 | 45分 | 水冷 | 1.6 | 1.2 | 6.3 | 1.2 | 2.8 | 0.1 | 0.3 | 12.1 | | | | 128 | 320 | 357 |
| 14 | | 825 | 90分 | 空冷 | 1.0 | 1.1 | 6.1 | 1.2 | 2.7 | 0.2 | 0.3 | 12.1 | | | | 128 | 320 | 357 |
| 12 | | 830 | 60分 | 空冷 | 0.9 | 1.1 | 5.6 | 1.2 | 2.2 | 0.1 | 0.3 | 12.8 | | | | 127 | 318 | 359 |
| 35 | | 870 | 50分 | 水冷 | 0.7 | 1.3 | 6.5 | 1.2 | 3.0 | 0.3 | 0.4 | 12.2 | 0.9 | 0.1 | 0.1 | 133 | 318 | 358 |
| 36 | | 870 | 50分 | 空冷 | 0.6 | 1.2 | 6.3 | 1.2 | 2.7 | 0.2 | 0.4 | 13.8 | 0.9 | 0.1 | 0.1 | 132 | 318 | 359 |
| 21 | | 925 | 17分 | 水冷 | 0.9 | 1.2 | 6.2 | 1.2 | 2.8 | 0.1 | 0.3 | 12.0 | | | | 129 | 304 | 357 |
| 20 | | 925 | 17分 | 空冷 | 1.1 | 1.2 | 5.8 | 1.2 | 2.8 | 0.1 | 0.3 | 12.2 | | | | 126 | 304 | 357 |
| 25 | | 960 | 17分 | 空冷 | 0.9 | 1.2 | 5.9 | 1.2 | 3.8 | 0.1 | 0.3 | 12.2 | | | | 128 | 305 | 359 |
| 11 | | 975 | 90分 | 炉冷 | 0.9 | 1.5 | 8.5 | 1.2 | 3.3 | 0.2 | 0.4 | 12.8 | | | | 136 | 321 | 350 |
| 17 | | R | 800 | 25分 | 水冷 | 0.9 | 1.1 | 6.3 | 1.2 | 2.6 | 0.1 | 0.3 | 12.0 | | | | 127 | 303 |
| 48 | 800 | | 25分 | 水冷 | 0.6 | 1.2 | 6.4 | 1.4 | 2.8 | 0.1 | 0.3 | 12.2 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 130 | 263 | 362 |
| 47 | 925 | | 17分 | 水冷 | 0.4 | 2.0 | 7.2 | 1.4 | 3.5 | 0.1 | 0.4 | 12.5 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 133 | 266 | 356 |
| 22 | 925 | | 17分 | 空冷 | 0.9 | 1.1 | 6.1 | 1.2 | 2.6 | 0.2 | 0.3 | 12.2 | | | | 126 | 304 | 359 |

(注)No. 1~26ではS、P、Tiは測定していない

表-17 定量分析結果

| 番号 | 試料種類 | 温度 ℃ | 滞留 時間 | 冷却 方法 | SiO ₂ % | Al ₂ O ₃ % | Na ₂ O % | B % | |
|----|-------|---------|----------|----------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------|--------|------|
| 42 | 廃 | 800 | 50分 | 水冷 | 53.84 | 13.32 | 0.58 | 2.00 | |
| 43 | | 800 | 50分 | 空冷 | 53.12 | 12.94 | 0.59 | 2.12 | |
| 27 | | 850 | 50分 | 水冷 | 51.12 | 12.06 | 0.46 | 2.26 | |
| 29 | | 850 | 50分 | 空冷 | 52.24 | 12.43 | 0.59 | 2.39 | |
| 28 | | 850 | 50分 | 水冷 | 50.04 | 11.87 | 0.55 | 2.16 | |
| 30 | | 860 | 50分 | 水冷 | 50.72 | 11.26 | 0.65 | 1.48 | |
| 31 | | 860 | 50分 | 空冷 | 51.84 | 12.24 | 0.54 | 2.20 | |
| 32 | | 860 | 50分 | 水冷 | 51.40 | 11.68 | 0.51 | 1.99 | |
| 33 | | 船 | 860 | 50分 | 空冷 | 51.88 | 11.64 | 0.51 | 1.80 |
| 34 | | | 860 | 50分 | 炉冷 | 51.40 | 11.49 | 0.61 | 1.76 |
| 2 | 残 | 880 | 14分 | 水冷 | 50.92 | 13.08 | 0.38 | 1.90 | |
| 3 | | 880 | 25分 | 水冷 | 51.66 | 13.24 | 0.46 | 1.85 | |
| 1 | | 880 | 28分 | 水冷 | 53.06 | 12.60 | 0.66 | 2.01 | |
| 37 | | 930 | 15分 | 水冷 | 52.80 | 12.21 | 0.69 | 1.89 | |
| 38 | | 930 | 35分 | 水冷 | 52.08 | 13.89 | 0.68 | 1.85 | |
| 39 | | 930 | 50分 | 水冷 | 51.28 | 14.57 | 0.66 | 1.83 | |
| 40 | | 930 | 50分 | 空冷 | 51.64 | 14.32 | 0.61 | 1.81 | |
| 41 | | 930 | 50分 | 炉冷 | 51.28 | 14.38 | 0.68 | 1.85 | |
| 4 | | 渣 | 940 | 43分 | 水冷 | 49.60 | 15.42 | 0.31 | 1.86 |
| 44 | | | 1000 | 50分 | 水冷 | 51.36 | 15.61 | 0.54 | 1.67 |
| 45 | 1000 | | 50分 | 空冷 | 52.76 | 15.32 | 0.57 | 1.75 | |
| 46 | 1000 | | 50分 | 炉冷 | 52.04 | 15.80 | 0.61 | 1.71 | |
| 26 | | 他のキルン炉 | | | 50.58 | 17.83 | 0.50 | 1.60 | |
| 19 | R + M | 775 | 30分 | 空冷 | 55.70 | 12.31 | 0.52 | 1.77 | |
| 15 | | 810 | 48分 | 水冷 | 56.08 | 11.64 | 0.54 | 1.83 | |
| 18 | | 810 | 55分 | 空冷 | 55.86 | 12.09 | 0.49 | 1.84 | |
| 16 | | 850 | 8分 | 水冷 | 55.74 | 11.64 | 0.50 | 1.83 | |
| 23 | | 925 | 21分 | 水冷 | 55.38 | 12.87 | 0.47 | 1.75 | |
| 24 | | 925 | 40分 | 空冷 | 55.06 | 13.46 | 0.50 | 1.75 | |
| 8 | | 930 | 30分 | 水冷 | 55.82 | 12.85 | 0.49 | 1.81 | |
| 9 | | 930 | 30分 | 空冷 | 55.34 | 13.11 | 0.57 | 1.73 | |
| 10 | | 930 | 30分 | 炉冷 | 55.34 | 11.30 | 0.57 | 1.71 | |
| 5 | | 940 | 90分 | 水冷 | 54.56 | 13.69 | 0.57 | 1.63 | |
| 7 | 940 | 90分 | 空冷 | 54.48 | 12.91 | 0.57 | 1.65 | | |
| 6 | 940 | 90分 | 炉冷 | 54.32 | 13.84 | 0.63 | 1.61 | | |
| 13 | M | 825 | 45分 | 水冷 | 55.76 | 11.88 | 0.56 | 1.82 | |
| 14 | | 825 | 90分 | 空冷 | 55.80 | 12.93 | 0.54 | 1.80 | |
| 12 | | 830 | 60分 | 空冷 | 55.94 | 11.14 | 0.54 | 1.80 | |
| 35 | | 870 | 50分 | 水冷 | 55.00 | 12.11 | 0.46 | 1.79 | |
| 36 | | 870 | 50分 | 空冷 | 54.88 | 11.92 | 0.57 | 1.80 | |
| 21 | | 925 | 17分 | 水冷 | 55.34 | 12.89 | 0.51 | 1.78 | |
| 20 | | 925 | 17分 | 空冷 | 55.44 | 10.54 | 0.45 | 1.74 | |
| 25 | | 960 | 17分 | 空冷 | 55.46 | 13.18 | 0.49 | 1.80 | |
| 11 | 975 | 90分 | 炉冷 | 55.30 | 14.11 | 0.63 | 1.67 | | |
| 17 | R | 800 | 25分 | 水冷 | 55.78 | 11.75 | 0.49 | 1.83 | |
| 48 | | 800 | 25分 | 水冷 | 54.96 | 13.51 | 0.51 | 1.72 | |
| 47 | | 925 | 17分 | 水冷 | 54.08 | 11.87 | 0.48 | 1.69 | |
| 22 | | 925 | 17分 | 空冷 | 55.22 | 12.70 | 0.50 | 1.80 | |

理を施したほうが良い。

- 熔融状態で緑色、外見的には巣は多い：
R+M (No.6,7,9)、廃船残渣 (No.27,28,29,37、39,40,41,44) R (No.47)
- 熔融状態で緑色、外見的には巣は少ない：
R+M (No.16)、R (No.22)、廃船残渣 (No.32、33,38,43)
- 熔融状態で緑色の中に白色、外見的には巣は多い：
R+M (No.10)
- 熔融状態で緑色の中に白色、外見的には巣は少ない：
M (No.14)、R+M (No.15)、R (No.48)
- 石状、巣が多い：廃船残渣 (No.2,3,26,30,34、42)

見栄えは緑色のものに比べ劣るが、通常の石と区別がつかなく、巣が多く脆いため碎片にしやすいといった特徴があり、道路工事等の増量材として適している。

- (2) 脆さ 全体的に簡単に崩れる。再利用の際には処理しやすい。
- (3) 大きさ 一般的には滞留時間に依存し、滞留時間が長くなると細くなる。

3.2.2 元素分析結果

蛍光分析で発生したX線の量の毎秒のカウント数(CPS)を表-16に示す。このカウント数は感度に依存するが、各元素によって感度が異なるため元素組成の量的な判定はできない。しかし、同じ元素の試料間での量的な比較は目安となり得る。蛍光分析の結果、以下のことが判明した。

- (1) 含有元素としてC、Mg、K、Cr、Fe、Cu、Zn、Sr、S、P、Ti、Al、Si、Caが検出された。
- (2) 3種類のガラス繊維試料-M+R、M、R-の場合各元素の数値にほとんど変化はない。
- (3) 廃船残渣試料の場合、ガラス繊維試料に比べてMg、Fe、Cu、Zn、S、P、Tiが増加し、Sr、Caが減少する傾向にある。Cu、Zn等の増加は塗料中に含有していた不燃成分によるものと考えられる。Caの減少傾向は再利用方法として可能性の高いゼオライトの精製には良い方向ではあるが、10%程度の減少では十分とは言えない。

また、SiO₂、Al₂O₃、Na₂O及びBの定量分析の結果を表-17に、処理温度と含有量の関係をそれぞれ図-11、図-12、図-13及び図-14に示す。これらの表と図から以下のことが明らかになった。

- (1) ガラス繊維試料の場合、SiO₂、Al₂O₃、Na₂O及びBは温度条件に関係なくほぼ一定の数値を示している。SiO₂は熔融前の含有量を維持している。一

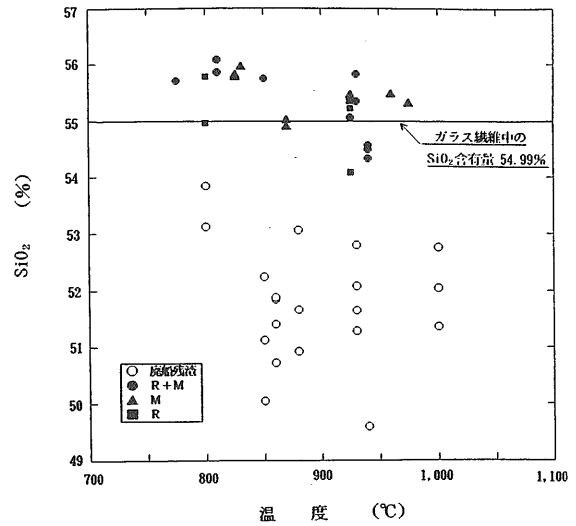


図-11 含有量と処理温度の関係 (SiO₂)

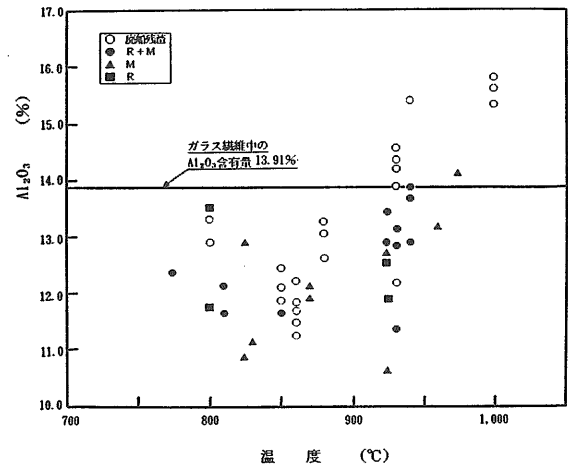


図-12 含有量と処理温度の関係 (Al₂O₃)

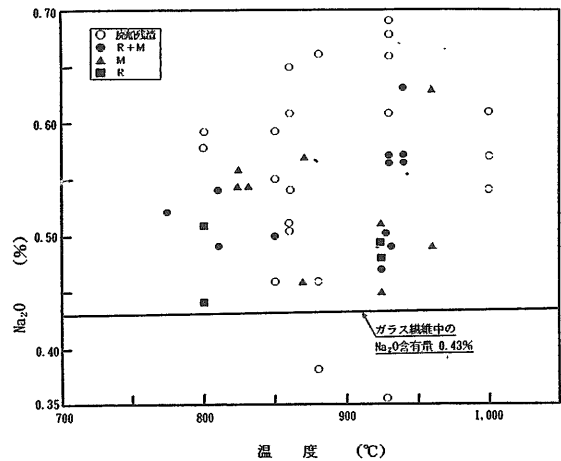


図-13 含有量と処理温度の関係 (Na₂O)

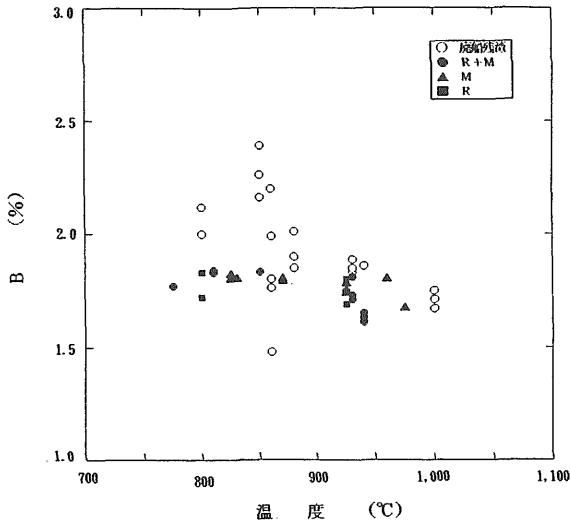


図-14 含有量と処理温度の関係 (B)

方、 Al_2O_3 と Na_2O は含有量に幅があり、かつ Al_2O_3 はガラス繊維に含有していた量より減少し、 Na_2O の場合は増加している。ガラス繊維試料熔融時の外部からの元素の混入は考えられないが、絶対量については計測していないので増加している理由は明らかではない。

(2) 廃船残渣の場合の SiO_2 、 Al_2O_3 、及びBはガラス繊維の場合の傾向と異なっている。 SiO_2 の場合は、各温度とも2~4%ほどガラス繊維によるものに比べて少なくなっている。 Al_2O_3 の場合は、950℃以上で増加する傾向にある。Bの場合には850℃以下では多少増加する傾向にある。一方、 Na_2O は、ガラス繊維試料の場合と同様に増加している。これらから今回定量分析を行った物質については、試料の含有成分はほぼ失われていないといえる。

3.2.3 物性分析結果

物性については乾燥重量、飽水試料の水中重量と飽水試料の重量を計測して、前述の計算式から見掛気孔率、吸水率、見掛比重及びかさ比重を計算した。その結果を表-18に示す。この四つの物性は計算式からも明らかのように相互に関連している。

従って、熔融固化条件による物性の変化については見掛気孔率との関係により検討する。表-18より温度と見掛気孔率との関係を図示(図-15)すると以下のような傾向が得られる。

- (1) 廃船残渣からは見掛気孔率がほぼ20%以上のものが得られるが、ガラス繊維からは10%以下のものが大多数を占める。これは、廃船残渣のガラス繊維が解れた状態で投入されたのに対し、MやRは収束剤や結合剤により固まった状態で炉に投入されたため空気が混じり難く、気孔の出来に差が出て来たものと考ええる。なお、吸着材等としての再利用のためには気孔率が大きいほうが望ましい。
- (2) 水冷の気孔率の方が空冷より大きい。固化する際に気体が徐々に抜けるが、冷却速度の早い水冷のほうが気体が内部に残りやすいためと考える。より冷却速度の遅い炉冷の気孔率が空冷より大きくなる場合があったが、その原因は不明である。

表-18 物性分析結果

| 番号 | 試料種類 | 温度℃ | 滞留時間 | 冷却方法 | 矽酸率% | 吸水率% | 見掛比重 | かさ比重 | |
|----|--------|-----|------|------|------------------|------------------|------|------|------|
| 42 | 廃 | 800 | 50分 | 水冷 | 20.4 | 10.1 | 2.54 | 2.02 | |
| 43 | | 800 | 50分 | 空冷 | 19.0 | 8.1 | 2.89 | 2.34 | |
| 27 | | 850 | 50分 | 水冷 | 27.8 | 20.4 | 1.88 | 1.36 | |
| 29 | | 850 | 50分 | 空冷 | 9.8 | 7.7 | 1.40 | 1.26 | |
| 28 | | 850 | 50分 | 水冷 | 14.3 | 12.0 | 1.38 | 1.18 | |
| 30 | | 860 | 50分 | 水冷 | 70.2 | 103.0 | 2.28 | 0.68 | |
| 31 | | 860 | 50分 | 空冷 | 36.5 | 38.7 | 1.48 | 0.94 | |
| 32 | | 860 | 50分 | 水冷 | 38.2 | 35.9 | 1.72 | 1.06 | |
| 33 | | 船 | 860 | 50分 | 空冷 | 試料が脆く、粉化するため測定不能 | | | |
| 34 | | | 860 | 50分 | 炉冷 | 49.6 | 36.7 | 2.68 | 1.35 |
| 2 | 880 | | 14分 | 水冷 | 試料が脆く、粉化するため測定不能 | | | | |
| 3 | 残 | 880 | 25分 | 水冷 | 試料が脆く、粉化するため測定不能 | | | | |
| 1 | | 880 | 28分 | 水冷 | 20.8 | 14.8 | 1.78 | 1.41 | |
| 37 | | 930 | 15分 | 水冷 | 58.3 | 41.6 | 3.35 | 1.40 | |
| 38 | | 930 | 35分 | 水冷 | 31.8 | 11.6 | 4.02 | 2.74 | |
| 39 | | 930 | 50分 | 水冷 | 19.7 | 16.3 | 1.51 | 1.21 | |
| 40 | | 930 | 50分 | 空冷 | 20.1 | 18.9 | 1.33 | 1.06 | |
| 41 | | 930 | 50分 | 炉冷 | 9.4 | 5.5 | 1.89 | 1.71 | |
| 4 | | 渣 | 940 | 43分 | 水冷 | 22.0 | 13.1 | 2.16 | 1.68 |
| 44 | | | 1000 | 50分 | 水冷 | 31.8 | 18.9 | 2.48 | 1.69 |
| 45 | | | 1000 | 50分 | 空冷 | 8.7 | 5.9 | 1.61 | 1.47 |
| 46 | 1000 | | 50分 | 炉冷 | 16.9 | 9.4 | 2.16 | 1.80 | |
| 26 | 他のキルン炉 | | | | 13.2 | 7.0 | 2.16 | 1.87 | |
| 19 | R+M | | 775 | 30分 | 空冷 | 26.9 | 14.3 | 2.58 | 1.88 |
| 15 | | 810 | 48分 | 水冷 | 11.0 | 4.8 | 2.58 | 2.30 | |
| 18 | | 810 | 55分 | 空冷 | 1.2 | 0.5 | 2.53 | 2.50 | |
| 16 | | 850 | 8分 | 水冷 | 15.0 | 7.1 | 2.50 | 2.13 | |
| 23 | | 925 | 21分 | 水冷 | 4.2 | 1.7 | 2.53 | 2.42 | |
| 24 | | 925 | 40分 | 空冷 | 3.5 | 1.5 | 2.45 | 2.36 | |
| 8 | | 930 | 30分 | 水冷 | 繊維質で脆いため測定不能 | | | | |
| 9 | | 930 | 30分 | 空冷 | 7.6 | 4.6 | 1.81 | 1.67 | |
| 10 | | 930 | 30分 | 炉冷 | 9.9 | 5.1 | 2.16 | 1.94 | |
| 5 | | 940 | 90分 | 水冷 | 5.4 | 2.8 | 2.03 | 1.92 | |
| 7 | 940 | 90分 | 空冷 | 4.6 | 2.4 | 2.05 | 1.95 | | |
| 6 | 940 | 90分 | 炉冷 | 6.4 | 3.4 | 1.98 | 1.85 | | |
| 13 | M | 825 | 45分 | 水冷 | 47.6 | 35.3 | 2.57 | 1.35 | |
| 14 | | 825 | 90分 | 空冷 | 4.7 | 2.0 | 2.48 | 2.37 | |
| 12 | | 830 | 60分 | 空冷 | 繊維状のため測定不能 | | | | |
| 35 | | 870 | 50分 | 水冷 | 3.1 | 1.0 | 3.09 | 3.00 | |
| 36 | | 870 | 50分 | 空冷 | 5.5 | 2.3 | 2.52 | 2.38 | |
| 21 | | 925 | 17分 | 水冷 | 2.6 | 1.0 | 2.63 | 2.56 | |
| 20 | | 925 | 17分 | 空冷 | 2.7 | 1.2 | 2.26 | 2.20 | |
| 25 | | 960 | 17分 | 空冷 | 7.5 | 4.3 | 1.92 | 1.77 | |
| 11 | | 975 | 90分 | 炉冷 | 18.3 | 17.4 | 1.29 | 1.05 | |
| 17 | | 800 | 25分 | 水冷 | 2.2 | 0.9 | 2.55 | 2.49 | |
| 48 | R | 800 | 25分 | 水冷 | 6.0 | 2.2 | 2.86 | 2.68 | |
| 47 | | 925 | 17分 | 水冷 | 1.7 | 0.6 | 2.82 | 2.77 | |
| 22 | | 925 | 17分 | 空冷 | 0.9 | 0.4 | 2.47 | 2.45 | |

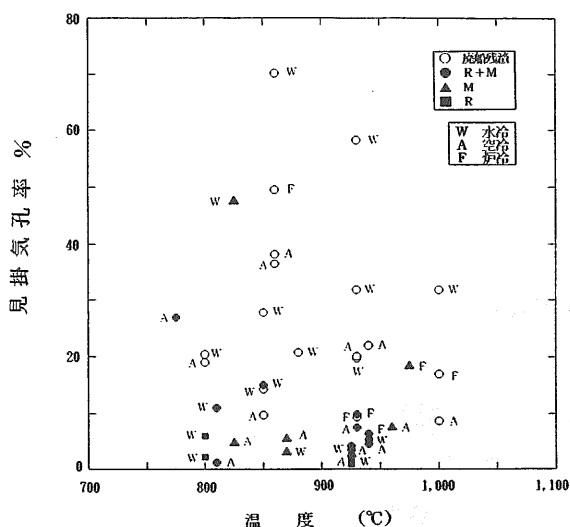


図-15 気孔率

(3) ガラス繊維 (Eガラス) の熔融温度 (830°C) から950°Cの間の炉内温度でかなり大きな気孔率が得られた。

3.3 まとめ

FRP 廃船の焼却無機残渣のリサイクルの用途開発が急がれているが、吸着材、土壌改良材等への再利用の可能性について基礎的な調査を行った今回の実験の結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 吸着材、土壌改良材等として使用するためには高い気孔率が必要である。気孔を多く作るためには廃FRPに熱処理をした廃船残渣が有利で、熔融温度は830~950°Cが最適である。また、水冷方法が空冷より気孔生成に適している。すなわち、廃船熱処理残渣をエネルギー的に有利な比較的低い温度で熔融したあと、水冷により固化回収する方法が最適である。
- (2) かなり大きな気孔率を得ることができた。その結果、吸着材、水質浄化材、土壌改良材等への再利用の可能性があると判明した。現在、水質浄化についての長期の実験を実施中である。
- (3) 熔融してもガラス繊維に本来含有していた組成元素は失われていので、元素の回収は可能である。

4 移動式 FRP 廃船処理装置の開発

世界で初めてのFRP船の廃船処理施設である移動式FRP廃船処理装置を(財)日本船舶振興会の補助金を受けて、(財)日本海洋レジャー安全・振興協会と共同研究により開発し、平成5年11月完成した。なお、製作は日立造船(株)舞鶴工場及びけいはんな環境(株)が担当した。本章では、当装置の開発までの経緯及び同装置の概要を紹介する。

4.1 開発に至る経緯

4.1.1 最終回収物の決定

開発に着手した平成2年当時の廃棄物処理のキーワードはリサイクルであり、平成3年には『再生資源の利用の促進に関する法律』が施行され、廃FRPの処分においてもリサイクル志向であることが要求された。FRPのリサイクルの研究は積極的に行われており、技術的にはかなり高度になっていた。しかし、経済的収支が合わないためリサイクル方法は確立されていなかった。このような状況のもと、3年後の完成時やそれ以降に世の中に受け入れてもらえる最終回収物を選択することが、当装置を開発する上で最初の課題であった。リサイクルの研究の趨勢等に留意して選択した最終回収物は3章で検討した熔融固化物である。熔融固化物は最も将来的にリサイクル技術として主流となる可能性が高く、万が一リサイクルされない場合でも、減容率が大きく、廃棄処分しやすいという大きな利点を持つと考えた。

4.1.2 開発目標と開発方針

最終回収物の決定に従って主な開発目標を以下のように決めた。

- (1) 無公害な装置であること。
- (2) 従来の方法(解体・破碎・埋め立て・輸送)より経済性に優れていること。
- (3) リサイクル志向であること。

この開発目標を満足するため採用した開発方針は次のとおりである。

- (1) FRPを構成している樹脂とガラス繊維を別々に処分する。樹脂は熱処理してエネルギーを回収し、ガラス繊維は熔融・冷却固化して製品化する。
- (2) 解体経費対策として、できるだけ解体工程を経ず、有姿状態で処理する。
- (3) 樹脂の熱処理時に発生するガス・熱をガラス繊維の熔融の熱源として利用する。
- (4) 輸送経費対策として、装置をトレーラーに搭載し現地に赴き処理を行う、「移動式」とする。

4.2 装置の概要

上述の方針により開発した移動式FRP廃船処理装置を図-16に、その主要目を表-19に示す。同装置の構成は以下のとおりである。

- (1) 乾留部
- (2) 熔融部
- (3) 補助装置

開発ポイントと概要を以下に示す。

4.2.1 乾留部

乾留部は、乾留炉本体、その床部の振動移送機及び破碎機からなる。

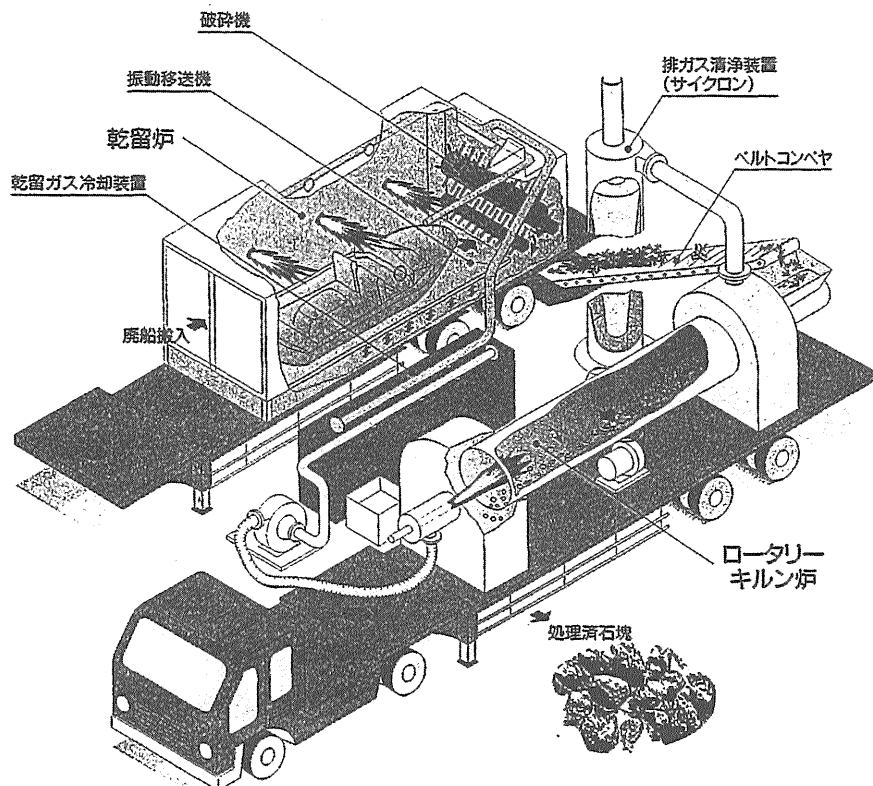


図-16 移動式FRP廃船処理装置

表-19 移動式FRP廃船処理装置主要目

| | 名称 | 形式 | 寸法(m)・容量 |
|----|---------|---------|-------------------|
| 主要 | 乾留炉 | 角型乾留炉 | 外形 長7.5×幅2.4×高2.3 |
| | 繊維残渣移送機 | 振動移送機 | 7.5kw |
| 機器 | 破碎機 | 回転式 | 2.5kw |
| | キルン | 円筒回転式 | 内径0.81 長7.0 |
| | キルン駆動機 | チェーン駆動式 | 2.2kw |
| | ベルトコンベヤ | 布ベルト式 | 0.4kw |

| | | 乾留炉車両 | キルン車両 |
|----------------|-----------------|---|-----------------|
| 装置 搭載 車両 | 登録内容 | 種別：普通、用途：特殊車 自家用 | |
| | 搭載寸法(全長×全幅×全高m) | 11.99×2.49×3.7 | 11.99×2.49×3.62 |
| | 車両重量(ton) | 15.120 | 15.86 |
| | 車両単体重量(ton) | 4.89 | 4.89 |
| トレーラ | | 平床式セミトレーラ 1591型 全長11.99m×全幅2.48m×全高1.36m | |

4.2.1.1 乾留炉

FRPの処分方法としてFRPを構成している樹脂とガラス繊維を熱的に分離する方法を採用した。熱的な処理方法には焼却による方法と熱分解による方法がある。焼却では処理時間が早い但未燃成分が少ないため熱エネルギー的な回収に難がある。一方、酸素が欠乏した状態で行う熱分解(乾留)では、エネルギー的な回収は十分行えるが、熱伝導の悪いFRPを一定温度に維持することが必要であるので処理時間がかかる。当システムでは、ガラス繊維の熔融を行う際に樹脂から回収した熱エネルギーを出来る限り利用したいとの要求と樹脂の処理時間を早くして処理効率を上げたいという、熱処理に関して相反する要求があった。検討の結果、一回の処理時間を通常燃焼時の2倍程度の約1時間にして、酸素を制御した状態での燃焼により樹脂をガス化し未燃成分を多く回収することとした。また、回収した未燃ガスは直ちに熔融の熱源として利用するため油に戻すことは行わなかった。乾留炉の炉内の大きさは、1.8m(W)×1.8m(H)×6.0m(L)である。これは現在国内に保有されているプレジャーボート・ヨットの約75%以上を解体せずに投入することが出来る。(表-20)寸法の大きなプレジャーボートの場合、部分的に機械的に切断して炉内に投入する。廃FRP船の着火のため、灯油バーナーを炉片面に2基、合計4基装備している。乾留炉の設計温度は900℃である。

表-20 プレジャーボート保有隻数(1991年)

| 長さ(m) | モーターボート | ヨット | 計 |
|-------|---------|--------|---------|
| ～3 | 28,825 | 2,587 | 31,412 |
| 3～4 | 76,008 | 16,949 | 92,957 |
| 4～5 | 37,178 | 21,294 | 58,472 |
| 5～6 | 22,344 | 1,656 | 24,000 |
| 6～7 | 23,537 | 2,910 | 26,447 |
| 7～8 | 23,294 | 3,161 | 26,455 |
| 8～9 | 2,755 | 1,782 | 4,537 |
| 9～10 | 2,102 | 826 | 2,928 |
| 10～11 | 746 | 452 | 1,198 |
| 11～12 | 320 | 137 | 457 |
| 12～ | 634 | 108 | 742 |
| 合計 | 217,743 | 51,862 | 269,605 |

※(財)日本海洋レジャー安全・振興協会推定値

4.2.1.2 振動移送機

FRP廃船処理装置の乾留炉内部において、乾留を終えたガラス繊維とその他の不燃物を粉碎装置に連続的に供給するために用いる。その方式として振動移送方式を採用し、乾留炉の床に振動移送能力を付加した。加震方式には大きく分類してアンバランス加震方式とクランクを用いる直接加震方式がある。アンバラン

ス方式は高い周波数の振動を得るのには有利であるが、800rpm以下の振動では系との共振により振幅が不安定になるなどの難点がある。一方、直接加震方式は大きな起動トルクが必要であるという難点があるものの、振幅が一定で安定した振動が得られ音も静かである。これらの特徴を考慮して当装置ではクランク方式を採用した。図-17にその原理図を示す。

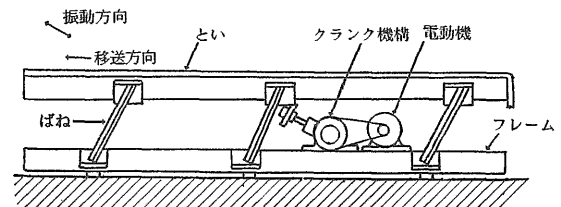


図-17 振動移送原理

振動移送の予備実験を行った結果、残渣は1.6G以上の加速度で移送できることが判明したので、加速度の目標を2.0Gとして、床の剛性や床の重量よりバネの選定を、また、起動トルク、軽量化、省電力等からモータの選定を行った。

また、乾留炉はトレーラーに搭載することから道路交通法の制約を受け全体の高さが限られている。一方、廃FRP船の多様性を考慮した場合、有効炉内高さを出来る限り確保したいことから、振動移送床の高さは0.5m以下とした。

さらに、乾留装置の床は自燃の炎により最高800℃程度の高温にさらされる可能性がある。このため、直接熱を受ける面は消耗する恐れがあり、消耗度に応じて簡便に交換可能とした。

4.2.1.3 破碎機

廃FRP船の熱処理後には投入時の形状を保った状態のガラス繊維が残る。ロータリーキルンの投入口の大きさに限度があるため、このガラス繊維を破碎する必要がある。乾留炉内において、振動移送装置から送られてくる熱処理を終えたガラス繊維とその他の不燃物を連続的に破碎する。

当初はガラス繊維に付着の炭素分や未処理樹脂分の付着により、破碎装置を大掛かりにせざるをえないかとの懸念もあったが、4.2.1.1の処理条件を採用した結果、処理温度が500℃以上になり、樹脂分や炭素はほとんど付着しないことが判明した。また、ガラス繊維は高温履歴により強度が極度に低下する⁸⁾ため、極めて容易に破碎が可能になり、簡単な回転式の破碎機の採用で十分であることが予備実験で確かめられた。そこで、図-18に示す円柱に刃を植え込んだ破碎機を採用した。

粉碎装置に送られてくる不燃物が破碎装置に詰まっ

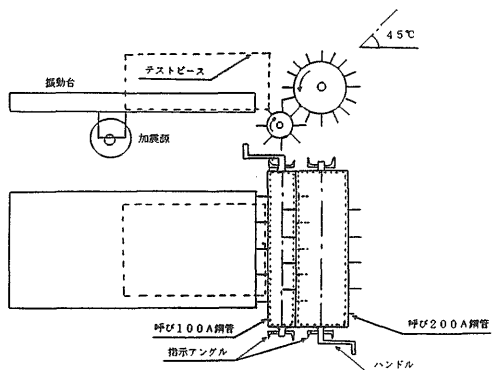


図-18 破砕機

てしまう事態（例えば、一度に大量の不燃物が粉碎に送られてくる等）に備えて、一定以上の負荷が加わった場合、停止、逆転、正転を行い、一時的な詰まりを除去する機能を付加した。

4.2.2 溶融部

破砕した残渣を回転炉—ロータリーキルン—で溶融する。炉の大きさは内径0.81m、全長約7mの回転炉である。炉の設計温度は1,000℃（船用FRPのガラス繊維（Eガラス）の溶融温度は830℃）で、残渣の連続投入を行うが、同時に溶融出来る最大量は1,000kgである。また、残渣の滞留時間は炉の回転速度によって任意に設定できる。なお、溶融残渣が適当な形状で排出するよう出口近くにダムを設けてある。燃料は灯

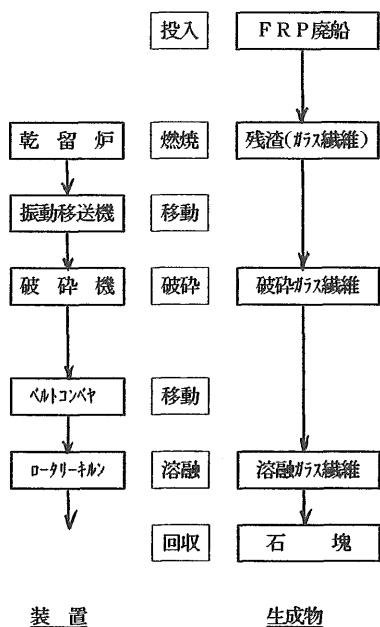


図-19 処理の流れ

油及び樹脂を熱処理した際に発生する乾留ガスである。

当装置は車両搭載により一般道路を通行するため、道路交通法により、大きさや重量が制限される。ロータリーキルンの重量を軽減するため、当初は空冷式を予定したが、冷却用送風機の動力が大きくなり、それに伴って発生音も大きくなる。検討した結果、内壁に軽量キャストブル（耐火用炉材）を内張りした断熱構造に変更し、送風機の使用を取りやめ、重量軽減と騒音対策とした。

4.2.3 補助装置

4.2.3.1 ベルトコンベヤ

破砕機直下の水槽に落とされた、破砕した残渣をベルトコンベヤで水槽からロータリーキルンに送るための装置である。その際、金属類の選別を人力により行う。

4.2.3.2 サイクロン

熱処理により発生したガスはロータリーキルンでの二次燃焼で完全燃焼し、その排ガスは最終的には排出する。その際、浮遊未溶融ガラス繊維がガスに混在する可能性があるため、燃焼排ガスのガラス繊維を遠心分離方式により回収するための装置である。

4.3 移動式FRP廃船処理装置の処理の流れ

以上の仕様により製作した装置を2台のトレーラーに搭載し現場に赴き処理を行う。処理の流れを図-19に、また、熱処理ガスの流れを図-20に示す。

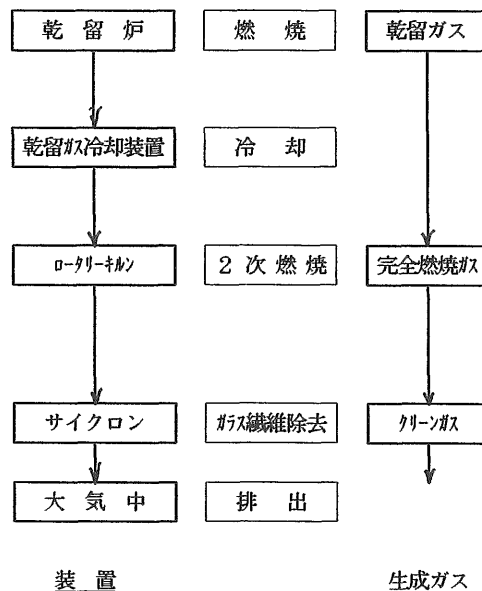


図-20 熱処理ガスの流れ

4.3.1 樹脂熱処理工程

まず、乾留炉に廃船を投入する。爆発の危険のある油タンク及び比較的大きな金属類は投入前に除去する。炉片面に2基、合計4基装備した灯油バーナーで廃船に着火したあと、自燃によりFRPの樹脂部分を焼却・乾留し、ガラス繊維のみとする。酸素量での温度制御により炉の高温化による損傷を防止する。処理温度は500℃以上で行う。投入方式はバッチ式で1回の投入量は最大500kg、熱処理所要時間は1回約1時間である。

4.3.2 熱処理残渣(ガラス繊維)移動・破碎工程

残渣のガラス繊維を、乾留炉の床面に取り付けられた振動移送機の振動作用により、乾留炉後部に取り付けた破碎機に送る。円筒に鋼製の刃のついた破碎機の回転によりガラス繊維を破碎し、破碎機直下の水槽に落とす。水槽から、破碎した残渣をベルトコンベアでロータリーキルンに送る。その際、金属類を人力により選別除去する。

4.3.3 残渣溶融固化工程

灯油及び樹脂を熱処理した際に発生する乾留ガスを燃料として、破碎した残渣をロータリーキルンで1,000℃までの温度で溶融する。1,000kgまでの同時処理量を連続的に処理する。炉内滞留時間1～2時間のロータリーキルン炉内での滞留後、炉外の水槽に落下・固化した残渣を回収する。

最終の回収物は石塊状の固形物であり減容率は大きい。例えば、長さ6mのモーターボートは総量約60～80ℓの石塊となる。

4.3.4 焼却・乾留ガスの処理・利用工程

樹脂を燃焼した際に発生するガスをロータリーキルンでの残渣の溶融熱源として利用する。発生ガスの高温による送風機の損傷を防止するためガスを冷却する装置—乾留ガス冷却装置—で一旦冷却した後、送風機でロータリーキルンに送る。ロータリーキルンでは二次燃焼してガラス繊維の溶融熱源として利用する。その際、ガスは完全燃焼しクリーンになる。しかし、浮遊している未溶融ガラス繊維がガスに混在する可能性があるため、燃焼ガスをサイクロンに送り、ガラス繊維を遠心分離方式により回収する。その後、完全にクリーンになったガスを装置外に排出する。

4.4. 実証試験⁹⁾

大阪及び横浜において実証試験を行い、排ガス・煤塵濃度の測定及びランニングコストを試算した。排ガス及び煤塵濃度の測定結果を表-21に示すが、窒素化合物、塩化水素及び煤塵の濃度のいずれも国の排出基

表-21 排気ガス及び煤塵濃度測定結果

| 計測項目 | 測定値 | 国の排出基準 |
|--------------------------------|-------|--------|
| 廃船重量(kg) | 600 | |
| 廃船空気導入口数(本) | 4 | |
| 湿り排ガス量(Nm ³ /h) | 1,450 | |
| 乾き排ガス量(Nm ³ /h) | 1,240 | |
| 煙突出口排ガス温度(℃) | 661 | |
| 酸素濃度(%) | 0.3 | |
| 一酸化炭素濃度(ppm) | 89 | |
| 二酸化炭素濃度(ppm) | 14.0 | |
| 窒素酸化物濃度*(ppm) | 112 | 250 |
| 塩化水素ガス濃度*(mg/Nm ³) | 70 | 700 |
| 煤煙濃度*(g/Nm ³) | 0.037 | 0.5 |

*印は酸素濃度12%換算値

表-22 平均処理費用
(FRP処理量 1.2トン)

| 科目 | 費用 |
|---------|---------|
| 燃料費 | 7,800円 |
| 電気代 | 1,075円 |
| 水道料 | 720円 |
| 工賃 | 60,000円 |
| 合計 | 69,595円 |
| トン当たり経費 | 58,000円 |

準より低い値を示し、公害発生に関する目標が達成された。また、人件費及び高熱水量を合計したランニングコストの結果は表-22のように、FRP重量1トン当たり58,000円となる。図-1には解体等個々の処分経費が示されている。一般的に行われている廃FRP船処理方法のうち、経費が最もかからないのは、解体—破碎—埋め立てであるが、その際の処分経費は単純に合計すると1トン当たり70,000～160,000円となる。経費に幅があるのは、処理量等により効率が異なることが主な理由である。現在の世論の動向は埋め立てによる最終処分を極力避け、リサイクルを義務づける方向にある。一般的にはリサイクル製品化のほうが埋め立てより経費負担増が大きいので、溶融固化物を最終製品とする当移動装置のほうが現行方法に比べて経済的に有利なことは明らかである。

4.5. まとめ

現在、河川・港湾等への放置や不法投棄で社会的に問題になっているFRP廃船処理問題に対処するために開発した移動式FRP廃船処理装置について紹介した。平成5年11、12月に船舶技術研究所でのお目見え及び横浜市と静岡県新居町での公開実験を行ったが、700名を超える官公庁、マスコミ、業界、ユーザー等

の見学者が参集し、極めて高い関心が示された。なお、平成6年会計年度には、経済的評価を行うため実証試験を公開して実施した。その結果、従来方法に比べて経費が軽減されること及び公害を発生しない装置であることが実証された。

世界で初めての①移動式、②低処理コスト、③リサイクル、④無公害の特徴を持つ装置の開発は、社会的問題であるFRP 廃船の放置による環境破壊の防止に役立つのみならず、あらゆるFRP 製品のリサイクルの実用化にも大きな道を開いた。さらには、処理経費の目安となるため、今後のデポジット制を含めたFRP 船処理にかかわる経費の負担方法の議論の基本となり得るものと考えられる。

5. あとがき

船舶技術研究所で十数年来取り組んで来ている廃FRP 船のリサイクルの試みを述べた。FRP を構成している有機分（主に不飽和ポリエステル樹脂）については熱分解によるサーマルリサイクル、無機分（主にガラス繊維）は高温溶融による製品化が技術的に十分可能であることを明らかにした。さらに、これらの技術を基幹とする、移動式FRP 廃船処理装置を開発した。

当研究の最終目的は廃FRP 船のリサイクルの実用化である。現在の世の中の廃棄物に対するキーワードはリサイクルであり、その点からはリサイクルに対して追い風が吹いている。しかし、現実的には経済性が実用化への大きなハードルとなっている。現在、船舶技術研究所では、本報での研究成果を組み込んだ、経済性に優れた廃プラスチックリサイクルシステムを構

築し、リサイクルの実用化を目指している。

最後に、廃FRP 船のリサイクルの研究実施にあたり、ご指導・ご協力いただいた、(株)道前築炉工業、けいはんな環境(株)及び(株)日本海洋レジャー安全振興協会に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本小型船舶工業会：FRP 船廃船処理システム開発委員会報告書、その1 昭和50年3月、その2 51年3月、その3 52年3月
- 2) 日本小型船舶工業会：FRP 船廃船解体方法に関する調査研究報告書、昭和55年度 56年3月、昭和56年度 57年3月
- 3) 日本造船振興財団：使用済みFRP 船解撤・処理体制調査研究報告書、昭和61年3月、62年3月
- 4) 林、永松：FRP 船廃船解体技術に関する研究、船研報告、昭和63年7月
- 5) 林、長田：洋上廃棄物リサイクルについて、船舶技術研究所春季講演会講演集、昭和63年5月
- 6) 住友重機械工業内部データ
- 7) 道前、小野木、大塚：混合廃棄物のガス化燃焼について、第38回廃棄物処理対策全国協議会全国大会講演集、昭和62年11月
- 8) 旭ファイバーグラス：ガラス繊維強度の温度依存性、FRP 協会焼却熱分解技術分科会資料、平成6年4月
- 9) 日本海洋レジャー安全・振興協会：FRP 廃船処理実用化技術の開発に関する調査研究報告書、平成6年3月