



〈技術レポート〉

焼却ボイラー水管壁用ライニング材

## 高流動性SiC系キャストブル「F-175A」

浜松研究所 RI分野 原 智 彦  
山 岸 徹

近年、ごみ焼却炉はボイラーを併設し、廃熱を利用して発電が可能な高付加価値型が主流となり始め、ダイオキシンの問題も絡み、焼却炉の運転温度はより高温に移行しつつある。また、炉内に施工される耐火材も、より耐久性の高い材料が求められている。流し込み施工用SiC（炭化珪素）系緻密質キャストブル（不定形耐火物）「開発品：F-175A」は、打ち込み施工品や吹き付け施工品のもつ施工性を改善し、セルフフローで充填可能な材料として開発したものである。本報ではその材料特性を紹介する。

### 1. はじめに

従来のごみ焼却炉は、主に燃焼による廃熱を利用して、近隣の施設（保養施設やプール等）への温水供給を目的としたボイラー付き焼却炉であったが、近年、電気事業法等の改正で、発電可能なボイラーを併設した大型焼却炉<sup>1)</sup>の建設件数が増加している。

また、ダイオキシンの問題が社会問題としてクローズアップされ、より安全で効率の良い操業を行うため、運転温度を高温化していく傾向が見られる。

ボイラー付きの焼却炉の場合、炉内側壁全面には排熱を蒸気に変えるため水管壁といわれる、水を輸送する配管が取り付けられている。この水管壁の複雑な表面形状に施工されるライニング材には、不定形耐火物の打ち込み施工品（ラミング材あるいはパッチング材ともいわれる）や吹き付け施工品が多く使用されているが、このような材料は施工において熟練した作業員が必要であり、しかも平面方向に積層していくため、層間で空隙が発生しやすい。

また、従来の打ち込み施工品や吹き付け施工品は気孔率が大きいため、焼却炉内で発生する燃焼ガスが浸透しやすく、耐火物の層間で塩化ナトリ

ウムや塩化カリウム等が白色の結晶となって凝固・蓄積され、耐火物の強度が低い場合には表層から耐火物が剥離・脱落してしまう傾向が認められている。したがって、水管壁に施工されるライニング材には、気孔率が低く、材料の強度を更に向上させた緻密質キャストブルの施工が望まれる。

また、近年水管壁に施工されるライニング材の厚さは25mm程度まで薄くなってきており、その上、水管壁表面には数十mmのピッチで多数のスタッドが溶接されていて狭大な隙間を形成している。このため、水管壁前面に型枠パネルを取り付けて、この隙間に現在広く市販されている振動施工型緻密質キャストブルを流し込み、パイプレータ等で振動を与えても、スタッド周囲への回り込みが不十分となり、未充填部分を作りやすいという問題点を抱えていた。

このような問題を改善するために、セルフフロータイプの流し込み施工型緻密質の不定形耐火物「F-175A」（以下、F-175A）が開発された。

### 2. 流し込み施工用SiC系緻密質キャストブル「F-175A」の概要

#### 2.1 焼却炉用ライニング材に求められる性能

ごみ焼却炉内部のライニング材として、次のよ

うな性能が求められる。

- 1) 塩素、イオウ、ナトリウム、カリウム等を含む腐食性ガスに対して耐久性を有すること。
- 2) 焼却炉の起動、停止に伴う急激な温度変化に追従できる耐スポーリング性を有すること。
- 3) 水管壁表面に付設されているスタッド（**図1**参照）に密着し、水管壁から脱落しない高強度の特性を有すること。
- 4) 炉内の温度を効率良く水管内に伝えると共に、炉壁の温度上昇による飛灰の付着を抑制できる高熱伝導率の材質であること。

以上のような条件から、前述のようなSiC系の打ち込み施工品、吹き付け施工品、あるいは型枠の下部からポンプで圧入する製品等が上市されているが、当社ではSiCを78%含有し、混練した材料を型枠上部から注ぎ込んだり、ポンプで流し込む事によって施工できる高流動性低セメントキャストابلを開発した。

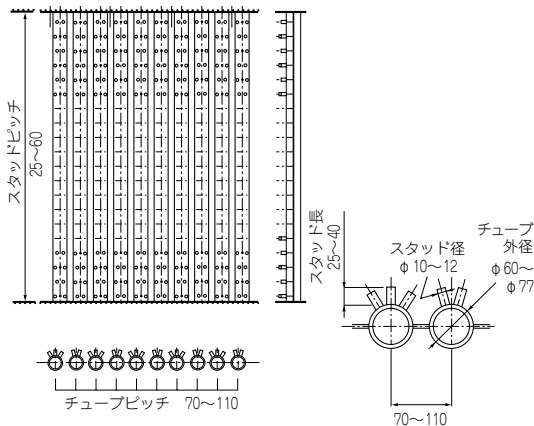


図1 水管壁用スタッド構造概略

## 2.2 低セメントキャストابلの流動性の発現

従来、アルミナセメント（以下、ACと略す）を結合材とした一般耐火キャストابل製品は、施工上混練水量を15%程度必要とするため、組織の緻密化が難しく、強度的にもACに依存しているため、煉瓦等に比較するとかなり弱い傾向にある。

また、AC中のカルシウム分（CaO）の影響によって、耐熱性、耐食性、熱間強度等の特性にも不利な要素を併せ持っている。

近年、有機分散剤の開発により、キャストابل

中の超微粉を従来の半分以下の混練水量で分散することが可能となり、従来結合材であったACは、均一に分散した超微粉を凝集させる凝集剤として機能し、緻密化と熱間特性向上の両方を達成することが可能となった。

しかしながら、このような通常の低セメントキャストابلは、高いチキントロピー性（振動によって、流動性が発現する性質）を示し、混練水量を低減できても施工の際はバイブレーター等で振動を与えないと流動性が発現しにくい傾向があった。

このため、F-175Aは原材料の粒度構成、分散剤の種類、そして混練水量等を検討し、複雑な部位に、充填が可能な高いセルフフロー特性を特徴としている。

このF-175Aについて、配合検討の一端を以下に示す。

### 2.2.1 粒度構成の検討

キャストابل材は、粗粒の骨材と呼ばれる大粒の粒子と、その骨材同士の隙間を埋めてマトリックスを形成する微粉部分で構成されている。

このように粒度の異なる数種の粒子が混在している場合、大粒の粒子が多すぎると水と混練した時ざらざらとした触感となり、大粒の粒子が互いに擦れ合って流動性が低下する傾向がある。また微細な粒子が多くなるにつれて、ざらざらとした触感は少なくなるとはなるが、材料の比表面積が増大するため混練水量が多くなり、いわゆるモルタル材のような状態になり、前述のような低水量で緻密化する事は困難になってくる。

したがって、粗粒と微粒をバランス良く配合する事で、微粉の混練物中に粗粒の骨材が分散し、水分が潤滑剤のような役割を果たすことによって、セルフフローによる流動性が発現されると考えられる。

次の**図2**は骨材を粗粒、中粒、及び微粒の3種類に分類し、骨材の配合比率を各種変動させて、混練直後の流動性を測定した結果である。

なお、流動性はJIS-R2521の「アルミナセメントの物理試験方法」に規定されているタップフロー値（規定量の円柱状試料を15回上下に振動させた時の径方向寸法）によって数値化した<sup>2)</sup>。ま

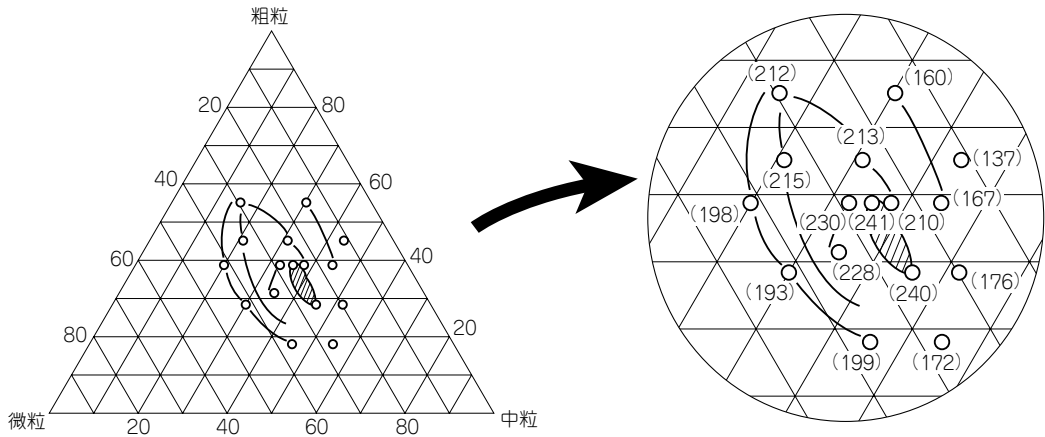


図2 SiC骨材の粒度分布とフロー値

た、図中の（ ）内の数値は、各比率におけるタップフロー値を示している。

この結果、タップフロー値240mm以上の流動性の良好な骨材比率の範囲は、粗粒：中粒：微粒 = 28～39：34～46：26～27であり、中粒及び粗粒方向に、ある程度の幅を持っていることが判明した。

また、この最適な範囲から微粒に比率をシフトさせると、急激に粘性が増加し、一方粗粒方向にシフトすると骨材と水が分離し始め、共にキャスタブルの流動性は低下する傾向が確認された。

### 2.2.2 分散剤の検討

分散剤の働きは、キャスタブル中の超微粒子間に取り込まれた水（包含水）を、自由に動ける水（自由水）として解放し、しかも結合材から生成する凝集イオンである多価陽イオンを一時的に封鎖する事であり<sup>3)</sup>、低水量で高流動性を確保する効果が期待出来る。従って、キャスタブルにとって最適な分散剤の選択は、重要なポイントとなる。

一般的に用いられている分散剤として、燐酸塩系、カルボン酸系、ナフタレンスルホン酸系、アクリル酸系、リグニンスルホン酸系、ポリアルコール系などの有機物及び塩類等多くの分散剤<sup>4)</sup>がある。ここで、それぞれの分散剤について規定量添加してキャスタブル材とした試料の流動性を測定した。

例として3種類の分散剤のタップフロー値を表

表1 各種分散剤の添加効果

分散剤	タップフロー値 (mm)	混練水量 (wt%)
A	241	7.5
B	197	7.5
C	166	7.5

1に示す。その結果、分散剤の種類によってキャスタブルの流動性は大きく変化することがわかる。

### 3. F-175Aの基本物性

F-175Aは、構成する粉体原料粒度分布を制御し、更に、施工後の急加熱による爆裂（材料内部に残留する水分の蒸気圧によって起こる内部破壊）防止対策を施して、施工性と被熱時の強度特性を効果的に発揮する材料となっている。

F-175Aの基本物性値を、打ち込み施工用のリン酸塩キャスタブル（A社製）と比較して表2に示す。

表2に示すように、F-175Aはフロー値（JIS：R 2521耐火物用アルミナセメントの物理試験方法のフロー試験に準拠）で241mmを示し、極めて高い流動性を有している。

また、高強度、低気孔率である緻密質キャスタブルの特長がはっきりと表れており、ごみ焼却炉用ライニング材として、高温で腐食性の高い燃焼ガスから水管壁を効果的に防御できる材料として位置付ける事ができる。

表2 開発品の性能比較

製品名	A社 打ち込み品	F-175A 流し込み品
混練液量 (wt%)	12.0 磷酸アルミ液	7.5 水
フロー値 (mm)	-	241
嵩密度 (g/cm³)	110 × 18hr	2.5
	1000 × 3hr	2.4
線変化率 (%)	110 × 18hr	-0.11
	1000 × 3hr	-0.09
曲げ強さ (kgf/cm²)	110 × 18hr	61
	1000 × 3hr	94
圧縮強さ (kgf/cm²)	110 × 18hr	275
	1000 × 3hr	488
見かけ気孔率 (%)	110 × 18hr	18.6
	1000 × 3hr	14.4
耐酸化試験 [1000 × 48hr] (%)	重量変化率	0.89
	線変化率	0.08
		0.13
熱間線膨張係数 (1 / )	at 1000	5.0 × 10 <sup>-6</sup>
		5.7 × 10 <sup>-6</sup>

#### 4. F-175Aの施工性

前述のようにF-175Aのきわめて高い流動性を利用し、従来困難であった高比重の緻密質キャストブルのポンプ圧送が可能となった。

##### ・F-175Aのポンプ施工実験

F-175Aのポンプ圧送を検証するため、表3に示す試験仕様により、小型スクイズ式ポンプで1m × 1mサイズの模擬水管壁パネル（図3参照）へのポンプ施工実験を行った。

表3のような仕様でポンプ施工実験を行った結果、吐出圧：7～9kgf/cm<sup>2</sup>、吐出量：3.7～4.4kg/minで所定の模擬水管パネルへの流し込みが可能であった。

流し込み後一晩（約17hr）放置した後、前面の

表3 ポンプ施工実験仕様

項目	仕様
スクイズ式ポンプ	動力：0.75kW (単相100V) 最大吐出量：30ℓ/min
圧送距離	横引き：18m 揚程：3m
ホースの概要	内径：40mm 種類：耐圧ホース

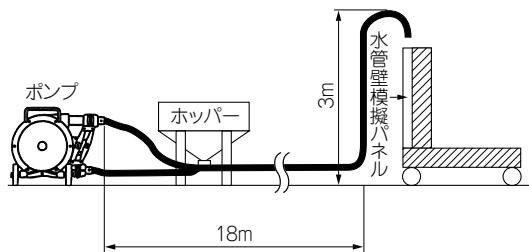


図3 ポンプ施工実験概略図

アクリルパネルを取り外したところ、施工部は完全に硬化しており（写真1）、断面方向の充填具合も写真2に示すように、有害なボイド（空洞）は認められず、きわめて均一な組織を形成している事が分かる。

#### 5. F-175Aの耐食性

- ・片面加熱塩水噴霧試験

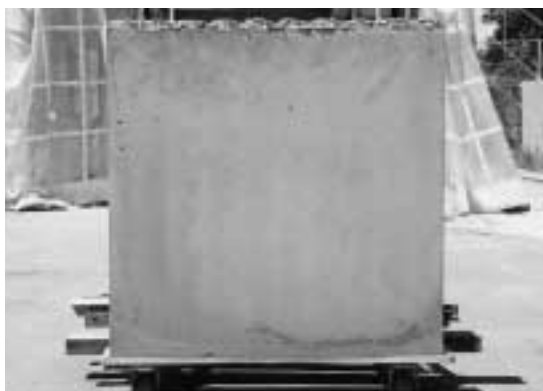


写真1 施工後正面



写真2 施工後断面

前述の1m×1mサイズ模擬水管壁パネルに図4のようにF-175AとA社のラミング材を半分ずつ施工し、常温養生及び800℃乾燥加熱を行った後、図5に示すヒートサイクルで1100℃加熱⇒塩化ナトリウム（12%）：塩化カリウム（12%）=1：1混合溶液（塩水）噴霧⇒室温放冷⇒1100℃加熱⇒塩水噴霧を20サイクル繰り返した。当社縦型ガス炉に前述の模擬水管パネルを取り付けて片面加熱試験中の状況を写真3に、塩水を噴霧している

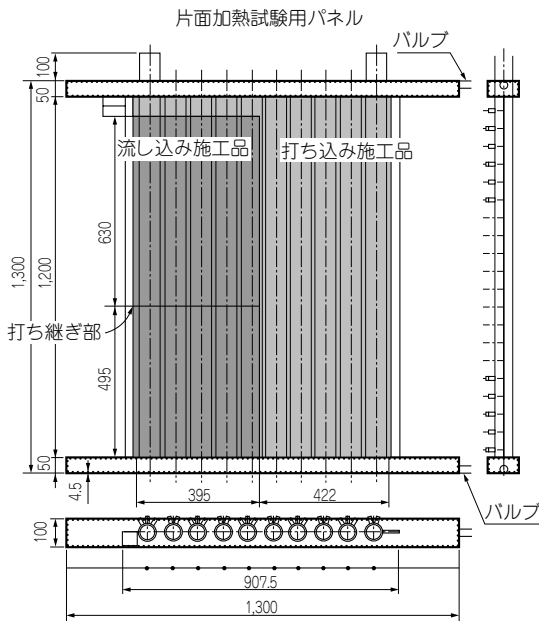
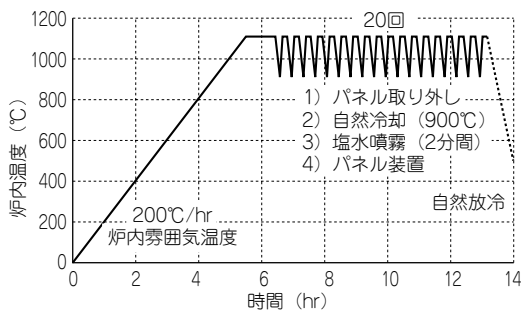


図4 水管壁模擬パネルによる施工試験

試験炉：耐火試験炉

試験条件



塩水：KCl（12Wt%）：NaCl（12Wt%）=1：1混合溶液

図5 水管壁模擬パネル加熱曲線

状況を写真4に、20サイクル後の試験体表面の状態を写真5にそれぞれ示す。

F-175Aは緻密で良好な状態を維持しているの



写真3 片面加熱試験 加熱中



写真4 片面加熱試験 塩水噴霧中



写真5 片面加熱試験 20回後

に対し、打ち込み施工品は表層部が一部剥離していた。

各耐火物の施工面をコアリングしてサンプルを採取し、ナトリウムとカリウム（以下、総称してアルカリ分と称す）についてX線マイクロアナライザーによる断面分析を行った。

分析の結果を図6のグラフに示す。打ち込み材は表面から800 $\mu$ m程度アルカリ分が浸透しているのに対し、F-175Aは300~400 $\mu$ m程度で浸透が止まっており、しかも表面部分でのアルカリ含有量が打ち込み材の1/2~2/3に抑えられている事が分かる。

また、ライニング各部の温度を測定した結果を図7のグラフに示す。F-175Aは、打ち込み品よりも緻密で熱伝導率が高いため、水管からの水冷効果により、打ち込み施工品の表面付近温度が880 $^{\circ}$ Cであったのに比べ、F-175Aのそれは740 $^{\circ}$ Cと140 $^{\circ}$ C程度低くなっていた。

この事により、F-175Aはライニング表面温度を低く抑えることができ、飛灰等の付着量低減が期待される。

## 6. 実機施工

F-175Aの耐久性評価のため、A市清掃センターのストーカー式ごみ焼却炉ボイラー水管壁改修工事で、縦500 $\times$ 横500mm、厚さは水管頂上部より30mmの厚さで施工した（図8参照）。現在まで1年8ヶ月経過したが、施工面に全く亀裂等は認められていない。今後も継続して外観チェックを行っていく事になっている。

また、B市清掃施設組合ごみ焼却炉新設工事に際しては、図8に示すようなボイラー水管壁の前壁湾曲部を始め、のぞき窓や温度計座の周り等の異形部分への施工を行い、滞りなく流し込み施工を完了した。この焼却炉も現在運転に入っており、特に問題は発生していないが、耐久性についての追跡調査を継続して実施していく事になっている。

F-175Aの高流動性を利用し、前述のボイラー水管壁表面へのライニングばかりでなく、図9に

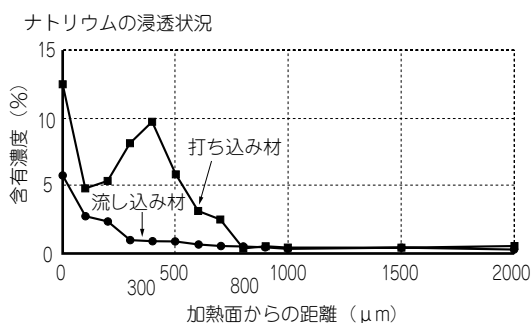


図6 コアリング分析結果

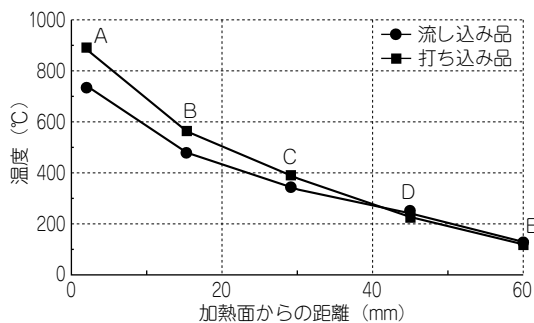
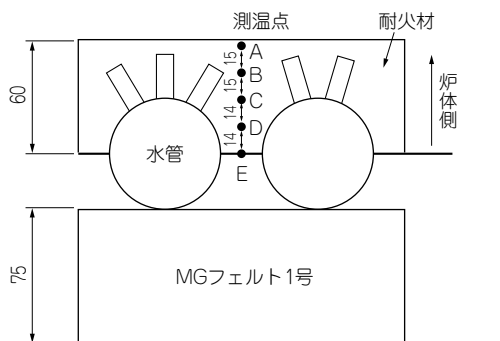


図7 水管壁における温度測定結果

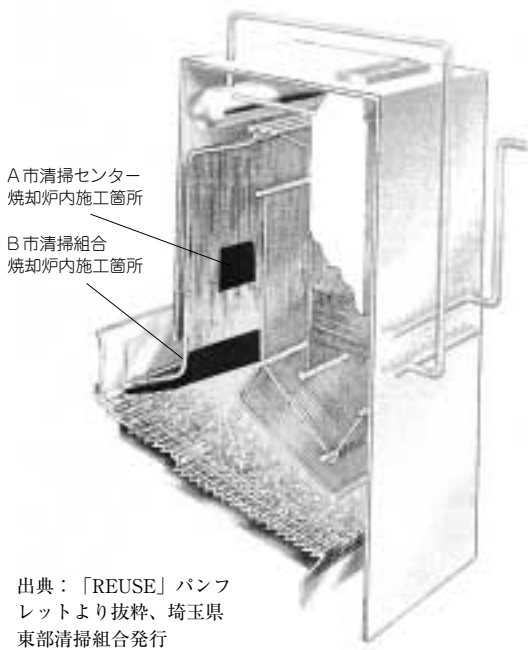


図8 ストーカー式ゴミ焼却炉断面図

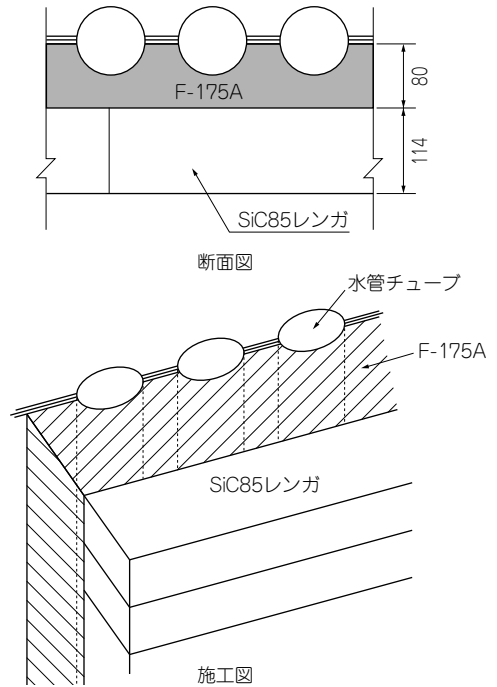


図9 別用途概略図

示すように、焼却炉側壁下部の水管壁とSiC煉瓦との間の80mm程度の間隙（深さ約2m）に流し込む施工例もある。

## 7. セルフフロー流し込み施工による工事費低減効果

セルフフローで型枠内に流し込みが可能となるF-175Aは、バイブレーターで振動を与える必要がなく、均一かつ緻密なライニング面を形成することが可能となる。

しかも、ポンプ施工を併用する事によって、その施工効率は更に向上し、施工時間の短縮と作業者の削減により、工事のコスト低減が期待できる。

## 8. おわりに

流し込み施工用SiC系緻密質キャストابل [F-175A]は、セルフフローで施工できる材料として、打ち込み施工や吹き付け施工等のように、熟練した作業員を必要とせず、しかもポンプによる圧送も可能にした省力型キャストابلである。今後も施工実績を増やし、お客様のニーズにマッチした改良検討を引き続き実施していく次第である。

## 参考文献

- 1) 「REUSE」パンフレット、埼玉県東部清掃組合
- 2) 山崎直樹, 原 智彦: 「流動床用緻密質キャストابل」, ニチアス技術時報, 1998. 5号 [No. 309] P10-11
- 3) 江口忠孝, 多喜田一郎, 吉富丈記, 桐谷外幸, 佐藤正孝: 「低セメント結合キャストابل」, 耐火物 [40] P206
- 4) 多喜田一郎, 吉富丈記: 「キャストابل耐火物の進歩」セラミックデータブック, 工業製品技術協会 (1991) P226

## 筆者紹介



原 智彦

浜松研究所 RI分野



山岸 徹

浜松研究所 RI分野