

アルミ合金の場合、引張強度の変換が特に困難です。引張強度が断面の引っ張りを測定するのに対して、BHNやその他の硬度計は断面の圧力を測定します、これらは実質的に物質の2つの異なる特性なのです。通常、同じ材料を異なる硬度計で測定した場合、±1~2%の誤差を考慮する必要があります。

磨耗

Talborの磨耗挙動は通常のアルミ合金やチタンよりも優れ、また合金鋼と同じかそれ以上です。磨耗特性は複合材料のセラミックの容積率に正比例します。セラミックの容積率が上がると、複合材料の耐摩耗性も上がります。セラミック含有量が増えれば、摩擦係数は下がります。セラミック粒子は摩擦面を滑らかにし、磨耗を最小限に抑え、摩擦を減らします。また潤滑状態のTalborや合わせ面の磨耗が非常に少ない点に注目する必要があります。Talborと比較材料の磨耗試験のデータを紹介します。

磨耗試験データ (リング試験で潤滑ピン使用、ASTM G-77)

材料	摩擦係数		体積減少 (10 ⁻⁶ in ³)
	開始	終了	
Talbor ~B25*	0.101	0.123	3.80
Talbor ~B20*	0.101	N/A	3.85
Steel with SPF-251*	0.141	0.129	8.00
A357 Squeeze Cast [§]	--	--	28.16

接触負荷 120 パウンド

接触負荷 30 パウンド

熱処理

熱処理可能なベース合金を使用する複合材料 Talbor は、T3、T4、T5、T6、T7、T8 やその他の様々な硬度の熱処理が可能です。通常のベース合金用の熱処理パラメータ

とは異なる、複合材料 Talbor 専用の熱処理パラメータをご用意しています。セラミックがエージング作用を加速し、硬度調整に必要なエージング時間を短縮します。また、溶液の浸透時間を調整し、セラミックの種類や容積率に完全に依存する複合材料の熱吸収挙動に対応します。また、複合材料 Talbor の冷却媒体としてグリコール溶液ではなく

水を使用する必要がある場合があります。また殆どの場合、冷却遅延時間を15秒以下にする必要があります。鑄造複合材料Talbor専用T5およびT4硬度の熱処理法が開発され、追加工程なしにT6硬度に近い機械的特性が得られます。また、複合材料Talborは、押出成形工程の後にプレス冷却を行います。そうすることで、後工程の溶液処理やエージング処理に比べ大幅な低コストで優れた機械的強度が得られます。TALON社は、航空宇宙品質の熱処理施設を持つ複数の複合材料加工パートナーと戦略提携しています。TALON社は熱処理に関する問題の解決に直接に対応します。

化学測定

複合材料の化学的性質は、標準アルミ用の機器や方法では定量測定できません。発光分光法（OES）は複合材料Talborの化学的性質の定量測定には適しません。複合材料に含まれるセラミックは、様々な合金成分の相対比率を計算するアルゴリズムの妨げとなります。妥当な半定量データを得るには結果の修正が必要となります。OES法は、アルミ粉末の個々の粒子を取り囲む酸化膜のために、PM製品には役に立ちません。PM製品TalborのOES法の結果は誤差が大きく、再現性もまったくありません。信頼できる定量的な化学データを得るには、誘導結合プラズマ（ICP）を利用した質量分析法や原子吸光分析法（AA）などを使用する必要があります。

二次面処理

Talborは、通常アルミコーティングに使用する材料を用いたメッキやコーティングが可能です。複合材料Talborはニッケルメッキや陽極処理も可能です。通常は、Talborの表面を化学的に不動態化処理または機械的にビードブラスト処理し、セラミック粒子をわずかに露出させ、コーティング面積を広げます。複合材料Talborは化学的ならびに機械的手法を用いて表面を磨き、鏡面仕上げできます。複合材料Talborは溶射コーティングも可能です。複合材料Talborは、特殊用途向けの窒化物や炭化物の皮膜処理も可能です。

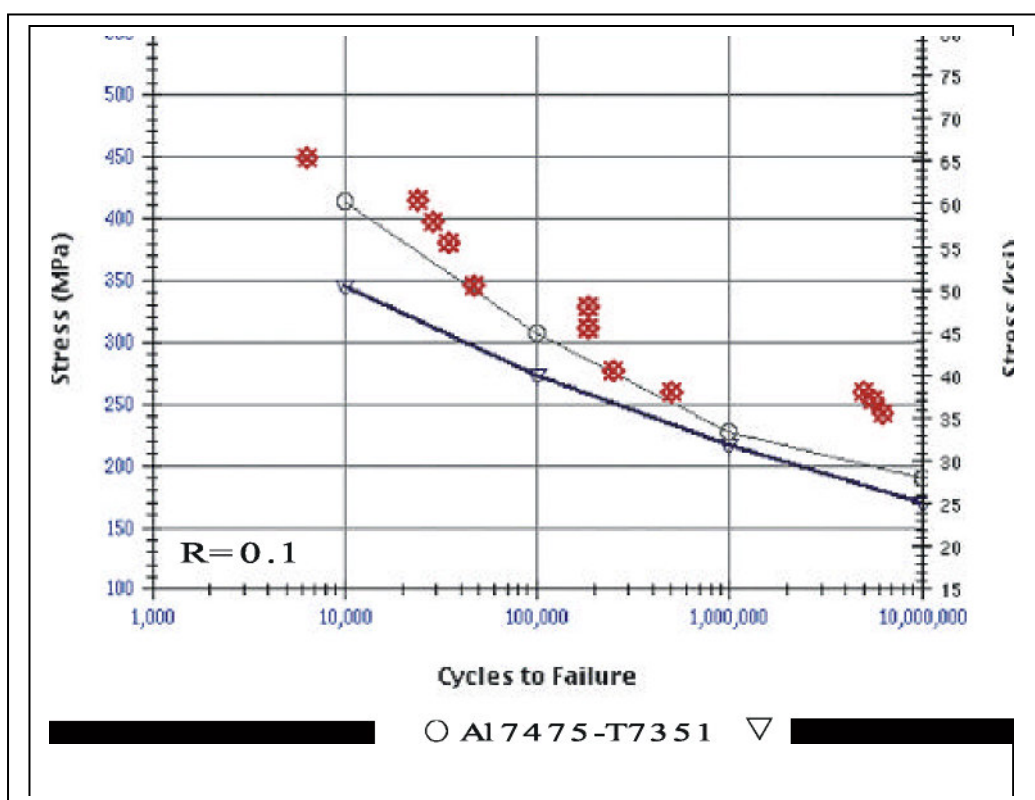
高温特性

複合材料Talborは、強度の高いセラミックのおかげで高温でも全体強度が高く、従来のアルミ合金に比べ高温特性に優れています。この特性は、優れた高温特性を持つベースアルミ合金との組み合わせによりさらに高まります。材料Talborは高温用途で最大限の性能を発揮します。Talborは、高温での耐摩耗性や剛性に優れたユニークな軽量材料です。

疲労

技術文献にも解説があるように、一般に、アルミベースの MMC は、従来のアルミ合金に比べ疲労挙動に優れています。疲労性能は、強化セラミックの容積率が 20%までは上がり、20%を越えると下がり始めます。Talbor 鋳造製品の疲労性能は、従来のアルミ合金に比べ特に優れています。これは、セラミックと溶融合金の優れた結合力の直接的な結果です。複合材料 Talbor の疲労割れの増加率は、低圧域ではアルミ合金に比べ低く、また高圧域では、非強化アルミ合金とほぼ同じです。セラミック含有量と熱処理の組み合わせにより、Talbor の疲労性能を設計要求に合わせてカスタマイズできます。

Talbor と従来のアルミ合金の疲労挙動の比較





Tal bor **H-15**, DB15-T **T-6**

AI 6061-T6

衝撃強さ/破壊靱性

アルミのように破壊靱性が中程度の材料とセラミック粒子を混ぜ合わせた複合材料は、ベースアルミ合金よりも破壊靱性が小さくなります。セラミックの容積率が上がると、材料の衝撃強さ/破壊靱性は下がります。

溶接について

溶接に影響を及ぼすアルミ複合材料の主な特性は、水素溶解度、酸化アルミ、熱伝導率、熱膨張率、凝固収縮率です。アルミベースの金属マトリックス複合材料の溶接気孔は、凝固時の溶融池に形成される水素の気泡や強化セラミックによるガス抜けが主な原因です。アルミ複合材料の水素溶解度は、材料が固体状態から液体状態に変わると約20倍に上がり、さらに温度の上昇に伴い上がり続けます。溶融状態で吸収された水素は、アルミ複合材料が冷却され、固体状態に変わるときに、溶液から強制排出されます。水素は気泡内に閉じ込められ、溶接部から除去できません。溶液から排出された水素は気孔や空洞となり、連結して真空環境下でリークパスを形成します。アルミ複合材料の溶融状態と固体状態の水素溶解度の比率は、鉄に比べ36倍の高さです。このため、アルミ溶接はステンレスに比べ気孔の取り扱いに一層の注意が必要となります。通常、水素汚染は溶接面の水分や油（炭化水素）、強化セラミック粒子の表面に閉じ込められた水分や油によって生じます。溶接前に溶接部品を洗剤槽で十分に洗浄し、乾燥させる必要があります。HシリーズB₄C強化複合材料Talborは、アルミ用のあらゆる溶接技術を用いて溶接できます。摩擦攪拌接合は強化複合材料を接合する有用な方法ですが、この方法を用いた溶接にはある程度制約があります。TIG、MIG、レーザー、電子ビームなど従来の溶接法はすべてB₄C強化複合材料に使用できます。複合材料Talborのセラミック粒子（炭化ホウ素）は材料の機械的特性を高めますが、アーク溶接工程に変更を加える必要があります。ただし、アルミ用の標準アーク溶接工程を少し改良するだけで問題を最小限に抑えることができます。

必要な機器

標準アルミ溶接機器に改良を加えずにそのまま使用できます。溶接ワイヤ（ER4043やER5356）が使用できます。薄い部分（3mm以下）にはガスタングステンアーク溶接（GTAW）が、また厚い部分にはガスマタルアーク溶接（GMAW）が適しています。

接合準備

接合準備に従来のタングステンカーバイド工具が使用できますが、複合材料にセラミック粒子が含まれるため磨耗度が高くなります。アルミ溶接同様、溶接前に接合部を洗浄する必要があります。接合部をきれいに仕上げるために溶剤の脱脂や清潔なステンレスブラシによる徹底した洗浄が必要となります。

自転車のフレームの一般的な GTA 溶接の手順を示します。

電源 : Miller Synchronous 250

機械設定 : 150A

電流 : 接合部形状により異なる

アーククリーニング : 70/30、最大浸透

高周波 : 連続

溶接棒 : 3/32-in, W-2% Thoria

溶接ワイヤ : 3/32-in または 1/8-in, ER5356

ガスキャップ : Weldcraft #5

シールドガス : 100% Ar、20 chf

上記パラメータは特定の工場の 1 台の機械の平均的な数値です。複合材料 Boralyn の溶接はアルミ溶接とほぼ同じですが、上記の注意事項を守る必要があります。

成形

Talbor はアルミ用の各種成形法を用いて加工できます。ただし、良い結果を得るためには、特殊工具や改良したプロセスパラメータを使用する必要があります。Talbor は圧延、鍛造、押出成形、スエージ、延伸、プレス、鋳造などの加工ができます。成形作業を容易にするため、フェロチック金型やダイヤモンドソーなど特殊工具が必要となります。TALON 社は多くの労力、時間、資源を注いで、二次工程作業に関する様々な問題点を把握し、戦略パートナーと協力し、顧客が複合材料 Talbor を成形するために必要なプロセスパラメータの最適化に努めています。従って、顧客はプロセスパラメータの学習カーブを気にせずに、複合材料を調達し、最終製品を製造できます。

多様な形状とサイズの押出成形

Talborは様々な形状やサイズの押出成形が可能ですが、金属マトリックス複合材料の押出成形は、従来のアルミ合金とは大幅に異なる特別のプロセスパラメータが必要となります。Talbor材料の押出成形にはせん断金型やコニカルダイが使用できます。Talborは直径3.5”、8”、11”、14”のピレットの成形が可能です（その他のサイズも特別注文で対応します）。押出成形製品の断面サイズは最大10”です。通常の機械的特性を保持した最小押し出し比は15対1です。押し出し比は、ピレットの初期表面積を押し出し形状の断面積で割って算出します。鍛造材料や圧延材料を製造する場合は、小さな押し出し比を使用できます。Talbor製品はいずれも管など空洞形状の押出成形が可能です。複合材料Talborの押出成形には、通常、セラミック・ダイ・インサートを使用します。均一な品質を確保するため、初期ピレットやコンテナの温度制御が極めて重要となります。通常、セラミック成分の熱容量を補償するために、ピレットの予備加熱に使用する誘導電気加熱炉のパラメータを改良する必要があります。

耐腐食性

Talborの耐腐食性は、複合材料のベース合金の化学的性質に依存します。耐腐食性については、アルミ合金に適用される規則がTalborにも適用されます。セラミック粒子が複合材料の腐食挙動にそれほど影響しないことが制御実験からわかっています。セラミック粒子とアルミ合金の間に異種金属接触腐食は生じません。耐腐食性が求められる用途には銅成分の少ないアルミ合金が最適です。

機械加工/切断

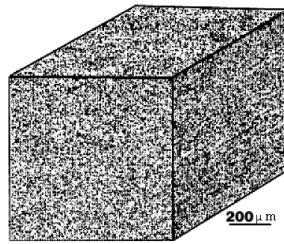
Talborは従来のアルミ合金と同じ機器を用いて機械加工できます。ただし、複合材料Talborの機械加工には必ず多結晶ダイヤモンド（PCD）工具を使用してください。複合材料Talborの機械加工には、ワイヤ放電加工機がたいへん効果的です。Talborの切断にはダイヤモンドバンドソーが必要です。従来のソーでもTalborを切断できますが、特にセラミックの容積率が高い複合材料（容積率10%以上）を切断する場合はすぐに刃が切れなくなります。セラミックの容積率が高いTalborでは、直径の小さいスレッドを切ることは困難です。Talbor製品は、ブローチ削りやクラッシュグランドを用いて、目的の形状や仕上げが可能です。できるだけスレッドをロールすることをお奨めします。TALON社は、各種複合材料Talbor用の特別のフィード/スピード・パラメータを掲載した完全機械加工ガイドをご用意しています。また、TALON社は、金属マトリックス複合材料の機械加工に適した特殊グレードのダイヤモンドを開発しました。特殊グレードのダイヤモンド工具はTALON社から直接購入できます。Talborは機械加工を含め従来の方法を用いて成形できますが、独自のTalborマトリックス内に炭化ホウ素が含まれているため、従来のアルミベースの材料のような機械加工はできません。

TALON社としましては、ほぼすべての機械加工用途に多結晶ダイヤモンド (PCD) 工具の使用を奨めています。PCD工具を推奨するのは、炭化ホウ素が人工材料の中で3番目に硬い材料だからです。様々な種類のPCD工具 (ドリル、エンドミル、リーマなど) が入手できますが、かなり高価であり、カスタムオーダーが必要な場合もあります。カーバイドやコバルト工具も使用できますが、炭化ホウ素粒子のために工具の寿命が急速に低下します (強化セラミックの容積率によっては寿命が数分の場合もあります)。PCD工具はカーバイドに比べ平均80倍長持ちします。また、PCD工具は整備して、再利用できます。PCD工具を用いた場合、Talborはチップロード0.005" ~ 0.01"で最大2,000sfm (surface feet per minute)の速度で機械加工できます。フライス削りや旋盤作業は、1パス当たり切断深さ0.07"を越えないようにする必要があります。最適性能は深さ0.05"です (幅は性能に影響しません)。

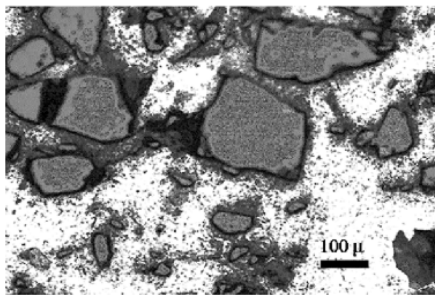
カーバイドやコバルト工具を使用しなければならない場合は、非常に遅い速度で機械加工する必要があります。また4"スパン当たり ± 0.002 "以上の公差を維持するのは困難です。

鍛造複合材料Talborのミクロ組織

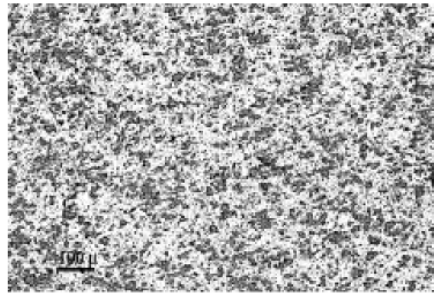
Talbor鍛造材料はPM法を用いて製造します。従って、セラミック粒子の分布が極めて均質になります。セラミック粒子のサイズは最大800グリット (最大平均13 μ m) です。ファインセラミックの粒子サイズとテーラーメイドの金属粒子サイズの分布により、極めて効率的な粉末の混合と充填が可能となります。均質な粒子分布 (下に示す顕微鏡写真参照) により、等方的な機械的特性を有する複合材料が生み出されます。複合材料のセラミック粒子が粒界を固定し、焼結工程や溶剤処理工程で粒子の成長を阻止します。微粒子の等軸組織により、金属マトリックス複合材料に適した延性が促進されます。PM複合材料Talborの加工工程では、セラミック粒子 (B_4C) とアルミマトリックスの接触面に有害な反応は生じません。独自の焼結工程により、Talbor製品には気孔がほとんど発生せず、最終複合材料に100%の密度が保証されます。このため、T6硬度の熱処理でも膨らみは発生しません。Talborのミクロ組織は、比較的柔らかなマトリックスに極めて硬い強化粒子が埋め込まれているため、断面を滑らかに磨くために特別のパラメータが必要となります。アルミ合金用の従来の金相法を用いて製作したTalborサンプルでは、満足いく結果は得られません。誤った研磨法でサンプルを研磨すると、セラミック粒子が露出し、ミクロ組織に気孔が発生する恐れがあります。TALON社では具体的なサンプル作製の手引きをご用意しています。



複合材料Talbor (NN15) のミクロ組織。B₄C粒子の均質な分布とx、y、z面の等方的な機械的特性を示しています。炭化ホウ素粒子のサイズは平均約10~12ミクロンです。



Boral @ 200 X



Talbor® H-15 @ 200X

上の写真は Talbor の微粒子組織と Boral 材料の組織を示しています。密度の高い微粒子組織が合金の熱安定性を保証します。一方、Boral 組織には隙間や気孔があり、板材の膨らみや反りの原因となります。Talbor は微粒子組織の

おかげで、中性子減衰に関連したチャンネルリング問題が起こりにくいのです。
また微粒子組織は機械的特性を高めます。

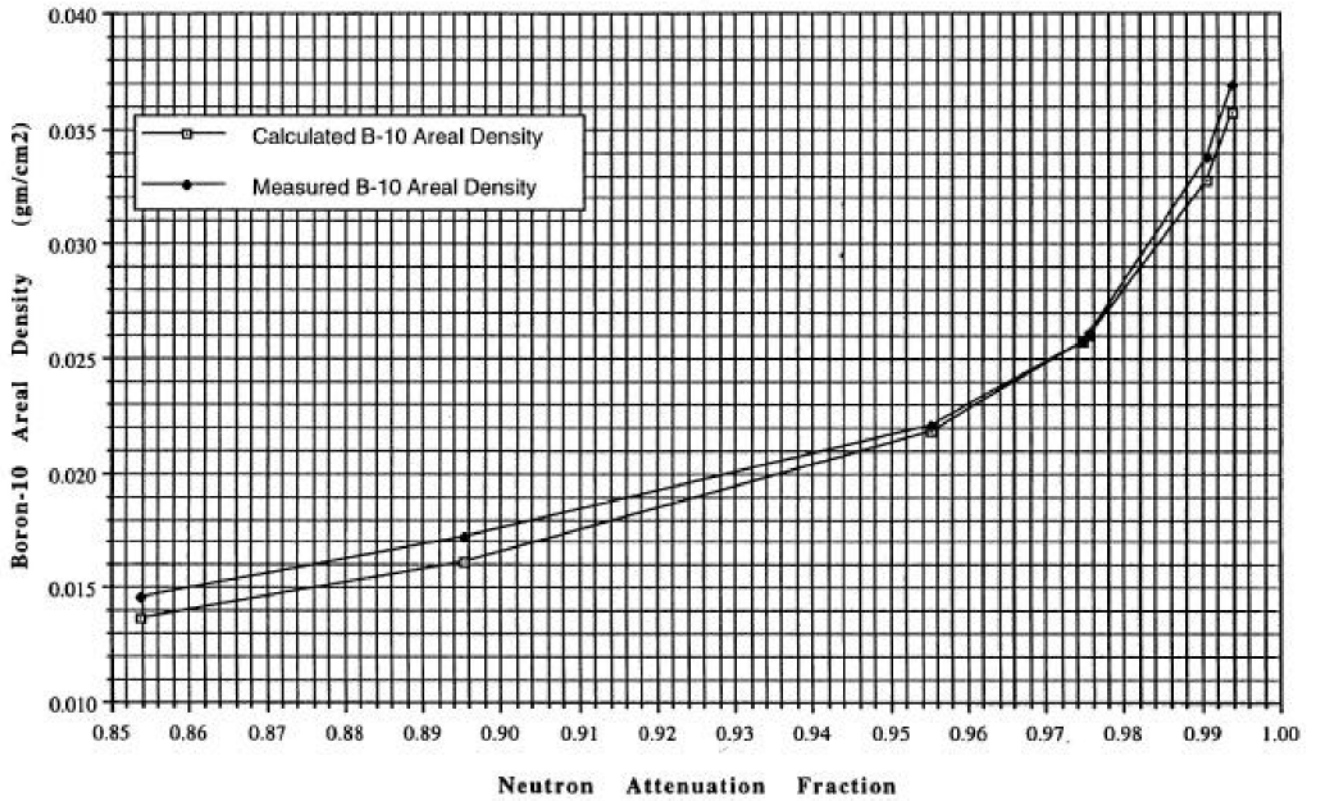
中性子減衰

中性子減衰は、「原子炉研究所 (Nuclear Reactor Laboratory=NRL)、007、第4版、中性子減衰」に従い測定しました。測定に使用した中性子スペクトロメータは、Boral 標準 (TS362-2-18, with a Boron-10 loading of 0.0257 gm B10/cm²/) を用いて較正しました。

Boron-10 面密度を測定、計算し、グラフにまとめました。測定値がたいへん近似していることがわかります。

試験結果をグラフに示します。

Measured and Calculated Boron-10 Areal Density Versus Neutron Attenuation



Talbor VHP Ingots – H-15 Material
Document 3980-44
Talon Composites, LLC

熱老化させ、照射した Talbor のミクロ組織の観察。透過電子顕微鏡および走査電子顕微鏡を使用

長期的に使用した場合に起こりうる不良のメカニズムを解明し、現在の材料を評価するために、熱老化させ、照射した伸縮性試料を分析しました。透過電子顕微鏡 (TEM) による照射サンプルの観察については、別途、放射線損傷報告書を参照してください。

熱老化サンプル。 B₄C相がアルミマトリックスと何の反応も示しておらず、700°Fではミクロ組織への熱老化の影響はほとんど認められませんでした。表面の色の変化とTEMによるサンプルの観察から、新たな相を生み出す相変化は1,000~1,100°Fの間で生じたものと思われます。1,000°Fまでは、アルミマトリックスの粒子の成長や再結晶化しか認められませんでした。従って、熱老化サンプルの降伏強度と破壊強度は共に、初期サンプルよりも小さくなることが予測されます。また熱老化サンプルの総伸張率も、ミクロ組織の軟化により小さくなることが予測されます。ミクロ組織の分析に基づくこれらの予測は、引張試験の結果 (Brown and Dunn in TTR-1参照) ととも整合しています。

照射サンプル。 電子回折像からはアルミ粒子の空洞など中性子照射の痕跡は認められませんでした。B₄C相は安定し、接触面は照射の影響を受けていません。粒子サイズには目立った変化は認められません。

破断面。 すべてのサンプルに通常の粒子間の破砕が認められるだけで、Al-B-C組織には特に不良原因は認められませんでした。アルミマトリックスとB₄C粒子の接触面は非常に強固であり、不良原因とはなりません。

寿命予測。 この材料には不良原因が認められず、またアルミ金属マトリックスの粒子の成長や再結晶化以外には相分解が生じないことから、1,000°F以下では長期的にミクロ組織に変化が生じることはない結論付けることができます。700°Fでの27日間の老化試験の結果、ミクロ組織には粒子の成長や再結晶化しか認められず、低温では相変化への長期的影響は認められませんでした。

熱および引張サンプル。 水焼入れ後、ヘリウム環境下で500°F、600°F、700°F、800°F、900°F、1,000°Fおよび1,200°Fの温度で4時間、サンプルを熱処理しました。透過電子顕微鏡用に700°Fおよび1,200°Fのサンプルを準備しました。引張試験後、引張サンプルをSEMで調べました。

破断面の観察。汚れないダイヤモンドソーによって引張試料の破断面のひとつを切断し、走査電子顕微鏡で観察しました。またTEM観察用の平面試料は、複合材料の特定の部分を切断して準備しました。これらのサンプルはヘリウム環境下で熱老化したため、老化後に目立った面損傷や面酸化は認められませんでした。様々な倍率で破砕原因を探し、詳細な破砕パターンを調べました。要約すると、微細な特徴の差はあるものの、延性、破砕挙動およびBACやFe-Al粒子の存在については、サンプル間で目立った相違は認められませんでした。SEM破断面観察法では、伸張特性はサンプル間でほぼ同じでした。700°Fで老化させたサンプルのミクロ組織は、粒子組織や化学的性質の点で初期サンプルとほぼ変わらないように思われます。B₄C相との反応やFe-Al相の分布に変化は認められませんでした。200°Fのサンプルについては、常に、多くの点で異なる特性が認められました。

試験と分析は下記の会社で実施しました。

- Talon Composites LLC, San Juan Capistrano, CA
- Transnucleaire, Paris, France
- National Technical Systems, Acton, MA
- Alyn Corporation, Irvine, CA
- ATEA, France
- University of Mass, Lowell, MA
- University of Irvine, Irvine, California
- Nuclear Reactor Laboratory, University of Michigan
- Framatome, Paris, France
- Polese Company, San Diego, CA