

特集記事・4

我が国のエネルギーを支える鉄鋼技術
【作る】

エネルギー生産の現場で活躍する特殊鋼鍛鋼品

Forging Products for Energy Industries

古瀬泰輔

Taisuke Furuse

大同特殊鋼(株) 鍛鋼品事業部
企画開発室 副主席部員

1 はじめに

世界の人口増や新興国を始めとする経済発展に伴い、エネルギー需要は今後大きく増加することが予想されている。これらのエネルギー需要増に対応しながら同時に温室効果ガスの排出を抑制するためには発電をはじめとするエネルギー生産の一層の高効率化が求められており、発電設備における高温化ニーズに対する材料開発が進められてきている。

一方、化石燃料生産は長らく資源の枯渇が議論されてきたが、米国を中心としたいわゆるシェールガス革命によって、安価で大量の化石燃料が得られる中で、原子力発電、風力、水力、バイオマス、海流発電等の再生可能エネルギーとのベストミックスがこれからの社会における大きな課題となっている。

本報では化石燃料の探査掘削の現場からA-USC用材料、ガスコンバインド火力発電プラントにおけるまで、エネルギー生産の現場で使用されている材料について鍛鋼品を中心にその例を紹介する。

2 石油・天然ガス掘削用高強度
非磁性ステンレス鋼鍛鋼品

2.1 140ksi 級非磁性ドリルカラー

化石燃料掘削においては経済的かつ効率的な生産を行うため、通常の垂直掘りだけではなく、坑井を傾斜させる傾斜掘り、あるいは一つの坑井から複数の傾斜掘りが行われている。傾斜掘りにおいては、ドリルピットの位置情報を得るための地磁気やガス・岩質のリアルタイム測定を行う必要があり、材料の磁気特性の影響を排除するために「非磁性ステンレス鋼（非磁性ドリルカラー）」が使用されている。非磁性ドリルカラーは地下数千メートルの圧力に耐える強度と硫化水素、塩化ナトリウム、塩化カリウム等に対する耐食性も要求

される。これは非常に過酷な環境であり、掘削深度や腐食環境などが日々変化してゆくことに対し材料としての信頼性を確保するため、16Mn-19Cr-3.5Ni-0.5N オーステナイトステンレス鋼が開発され、温間鍛造により加工硬化された引張強さ140ksi (965MPa) 級の材料が実用に供されている¹⁾。

2.2 耐食性向上材の開発¹⁾

一方、高まる耐食性の要求に応えるため、上記140ksi級非磁性ドリルカラー材料をベースとして、耐食性を向上させるMo、N増量させた合金の開発も行われ、実用化されている。(16Mn-19Cr-3.5Ni-2Mo-0.53N) 化学成分を表1に示す。

耐食性向上材は非磁性ドリルカラーとして必要な引張強度(140ksi)を維持しながら、以下のとおり耐食性を向上させることに成功している。

- 1) Moの増量により炭化物析出ノーズが長時間化し、鋭敏化に対する抵抗性が上がることで耐粒界腐食性の向上させた(図1、図2)。
- 2) 塩素イオンによる孔食電位の上昇、塩酸に対する腐食減量が低減されており、耐食性全般を向上させた(図3、図4)。

またベース材料と同等の靱性(吸収エネルギー260J程度)であり、実用上十分な性能を有している。

この非磁性ドリルカラー材料はインゴットから熱間鍛造・固溶処理されたの後、適正な温度で温間鍛造されることにより、加工硬化による強度が確保される。高い耐食性を持つ本非磁性ドリルカラーは掘削用鍛造品の中でも製造難度が高

表1 140Ksi 級ドリルカラー (DNM140) と耐食性向上材の化学成分

Material	C	Mn	Ni	Cr	Mo	N	PRE
Developed Steel	0.04	15.6	3.6	18.5	2.1	0.53	34.2
DNM140	0.04	15.7	3.3	18.7	0.9	0.51	29.7

PRE=Cr+3.3Mo+16N

く付加価値の高い製品であり、世界各地の石油、ガス掘削現場で使用されている。

3 遠心圧縮機インペラー用鍛鋼品²⁾

掘削された天然ガス、シェールガスの液化・精製、石油化学プラント、ガスパイプラインなどの幅広い分野で、遠心圧縮機は欠かすことができない(図5)。この遠心圧縮機の主要部材において、ケーシングは主に鋳造品が用いられ、一般に鍛鋼品はインペラー(羽根車)と回転シャフトに適用されている。中でも高速回転体として大きな遠心力にさらされるインペラーは、内質・機械的性質に優れる信頼性の高い鍛鋼品によって製造される。インペラーは使用される設備、環境によってさまざまな材質が選定される。

たとえば炭酸ガス、水素等の不純分ガスを含有した環境にさらされるエチレンプラントに対しては高強度型マルテンサイト系ステンレス鋼(SUSF6NM)や析出硬化型ステンレス鋼(SUSF630)などが用いられる。シェールガス田から取り

出されたガスなど硫化水素(H_2S)、塩素イオン等を多く含み、腐食性の高い環境下で使用される場合は、更なる耐食性が求められており、これらの使用環境に対応できる二相ステンレスや改良マルテンサイト系ステンレス鋼の使用も検討されている。

3.1 インペラー鍛鋼品の製造技術

高速回転体であるインペラー鍛鋼品の溶解に対しては、化学組成の均質化、非金属介在物低減、凝固時に発生し得る有害なマイクロ偏析を低減し材料の信頼性を向上させるため、再溶解法(VAR、ESR)がしばしば適用される。

一般にインペラーは主板(Hub)と側板(Cover)で構成されるが何れも中心孔を持つ山形リング形状である。インペラーの熱間加工(鍛造)において単純リング形状でなく、山形リング形状に近い形で鍛造・成形すること効率的生産のキーポイントとなる。各鍛鋼品製造メーカーにおいてより製品形状に近い形状への鍛造を図っているが、形状、得られる材料特性も加味した独自の材料予測システムを開発し運用し

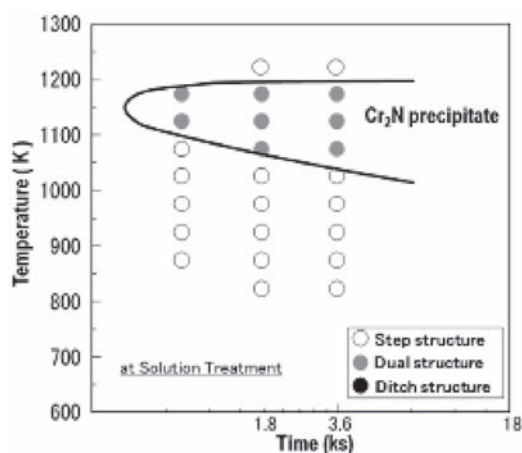


図1 TTTダイアグラム(耐食性向上材)

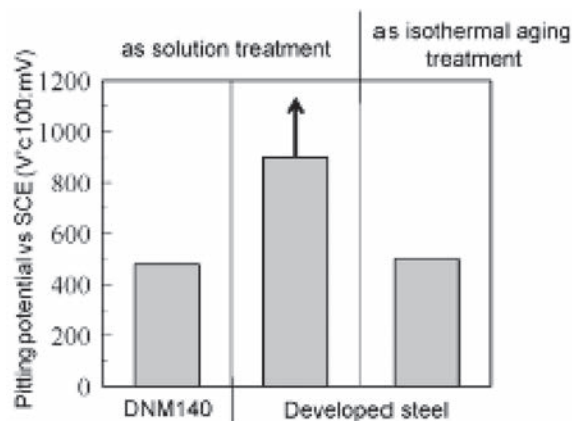


図3 3.5%NaCl溶液中の孔食電位比較

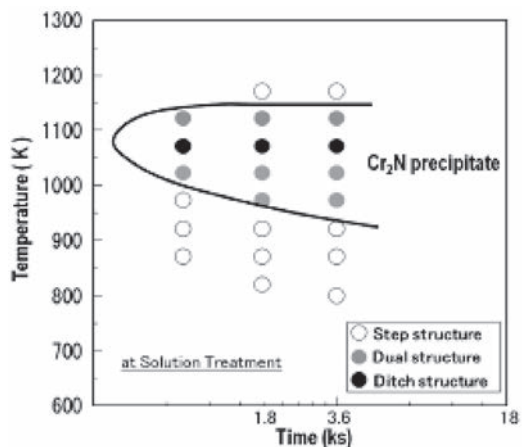


図2 TTTダイアグラム(従来材)

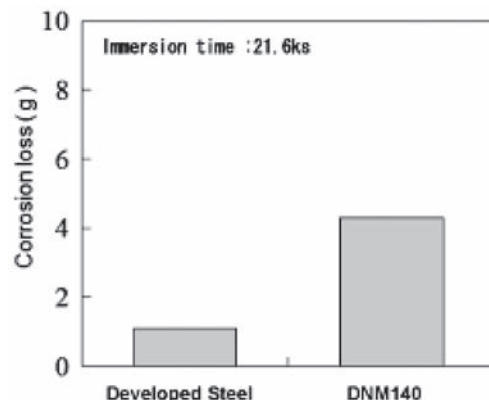


図4 10%HCl溶液中の腐食減量比較

ているケースもある (図6)。

また、製品の非破壊検査や寸法測定も競争力を左右する重要な要素であるが、それぞれ自動超音波探傷機や三次元測定機による品質保証が進んでいる。

4 発電プラント用鍛鋼品

新興国を中心とする発電需要は今後増加することが見込まれ、また先進各国においても地球温暖化対策としてのCO₂ガス排出削減の手段として、化石燃焼を使用する石油、石炭、天然ガス発電における高効率化が求められている。現在、大規模な発電プラントとしては原子力と火力 (スチームタービン、ガスタービン) が挙げられるが、原子力発電に用いられるスチームタービンは、その蒸気温度は高々300℃付近であることから、高温高圧化による効率化が指向されるというよりは、蒸気発生器における熱交換効率化や各種圧力損失の低減、タービン翼大径化などのタービン設計における高性能化に主眼が置かれている。

一方、火力発電においてはスチームタービン発電におけ

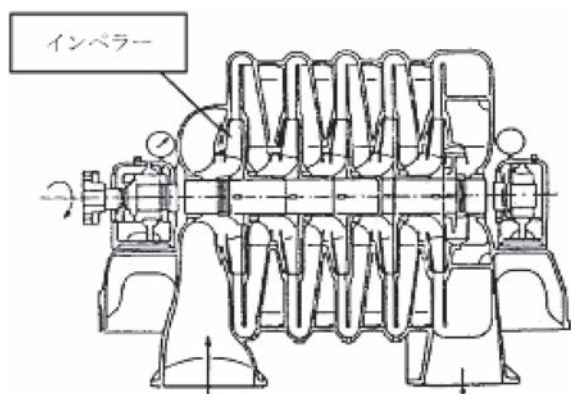


図5 遠心圧縮機 (断面図)

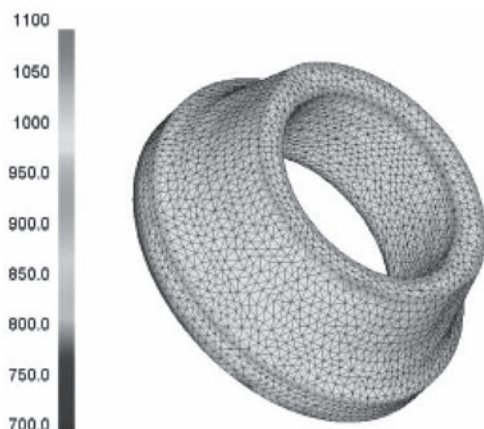


図6 ニアネットシェイプ鍛造による形状シミュレーション

る蒸気条件の高温・高圧化による高効率化が図られてきている。1950年代初頭においては450℃、4MPaであった蒸気条件は年々上昇が図られ、現在では600℃、25MPaの超々臨界圧 (USC : Ultra Super Critical) プラントまで実用化がおこなわれている。更なる効率化が期待される中、700℃超級 (A-USC : Advanced USC) 蒸気タービンの開発が日本、欧州、米国において国家プロジェクトレベルで取り組まれている³⁾。

ガスタービン発電における高効率化は燃焼ガス温度の高温化が図られる一方、ガスタービンの排熱を利用し蒸気タービンを駆動させることによる複合発電 (コンバインドサイクル発電) プラントも実用化され、発電プラントのスタンダードシステムとなりつつある。

本項では、スチームタービン、ガスタービン用材料の開発例と製造技術について述べる。

4.1 A-USCスチームタービン用材料⁴⁾

蒸気タービンの主機は蒸気の入り口である主蒸気止め弁、蒸気加減弁、動力発生部である翼列およびこれを収納するタービン車室、蒸気の熱エネルギーを回転動力に変換するタービンローターとこれを支持する軸受と軸受台から構成されている。

高温蒸気環境と回転による遠心力が掛かるタービンローターは最も材料負荷の大きい部材であるが、この材質には566℃以上の超々臨界圧 (USC : Ultra Super Critical) プラントにおいて耐熱性を高めたフェライト系耐熱鋼 (改良12Cr鋼) が使用されてきている。

更に熱効率を高めるべく開発がすすめられている700℃級 (A-USC : Advanced USC) プラントのタービンローター、ケーシングボルトにおいては、700℃以上におけるクリープ強度の低下により改良12Cr鋼では性能に限界があり、高強度のNi基合金の適用が必要となる。しかしNi基合金はオーステナイト系であるためフェライト系耐熱鋼に対比して、熱膨張係数が大きく設計の制約が大きい。このため、高温における高強度を維持したまま熱膨張係数を低減させたNi基超合金LTES700 (Ni-12Cr-18Mo-0.9Al-1.1Ti) が開発されている。

また、タービンローター用に大型化を考慮した改良型合金LTES700R (Ni-12Cr-18Mo-0.9Al-1.1Ti) も開発され、現在ディスク形状での試作評価が行われている。

LTES700Rと12Cr鋼、Ni基耐熱鋼 (Refractaloy26) の熱膨張係数を図7に示す。

タービンブレードについても、蒸気温度の高温化に対応すべく改良が進められてきている。一例として改良12Cr鋼をベースとした3%Co添加の10%Cr鋼 (MTB10AA) を挙げる。本材はローター材として開発された3%-10%Cr-0.7%Mo-1.8W

鋼 (MTR10A) に対し、Nb+Ta添加により結晶粒内MX析出物 (Nb、Vの炭窒化物) の析出強化を図り、クリープ強度を向上させた材料である。本材はブレード材としての信頼性を確保するため、再溶解法により製造されるが、低Si、且つB添加であることから再溶解中の大気酸化を極小化できる真空エレクトロスラグ再溶解 (VSR) が用いられる。図8にクリープ破断試験の結果を示す。従来のブレード鋼に対し、MTB10AAは温度換算で30℃の強度改善が図られており、既に600℃級プラントに適用されている⁵⁾。

一方、700℃級 (A-USC : Advanced USC) を超える800℃級ボイラーによるタービン発電を目指す材料開発も進んでいる。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究「耐用温度800℃級蒸気タービン鍛造品の開発」において、2006年、金属間化合物 (Ni_3Al 、 $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$) を最適に分散させたNi基合金とCo基合金が開発され、実機サイズ、Ni基合金においてはボイラーチューブ・動翼ブレード、Co基合金においては大型鍛造品製造に向けた1トン鋼塊からの $\phi 200$

鍛造品の製造性も確認されている。これらは材料に対して、蒸気温度向上による発電効率の高効率化を目指した800℃級火力発電プラント向けとして更なる材料特性の向上に向けた研究が進んでおり、今後の開発と実機適用が大きく期待されている⁶⁾。

4.2 ガスタービン用材料

産業用大型ガスタービンの構造断面図の例を図9に示す。大型ガスタービンは主に圧縮機 (Compressor)、燃焼器 (Combustor)、タービン (Turbine) から構成されるが、圧縮機、とタービンは写真1に示すような翼車板がタイボルト (スピンドルボルト) で結束されローターを形成する。稼働中の圧縮機部の温度は約350℃～500℃に達し、またタービン部は1000℃を超える燃焼ガスに対する耐熱性を有する材料によって構成される。ブレード材およびローター材のコンプレッサー部はともに耐熱性に加え、靱性に優れた2.25Crや3.5Ni含有のローター用合金高や12Cr鋼が用いられるのに対して、タービン部は1000℃を超える高温ガスにさらされるため、高温強度に優れたNi基耐熱合金が多く用いられる。大型ガスタービンは構造上、ローター内部を空冷することができるため、耐熱性の低い材料を用いる場合があり、Ni基耐熱合

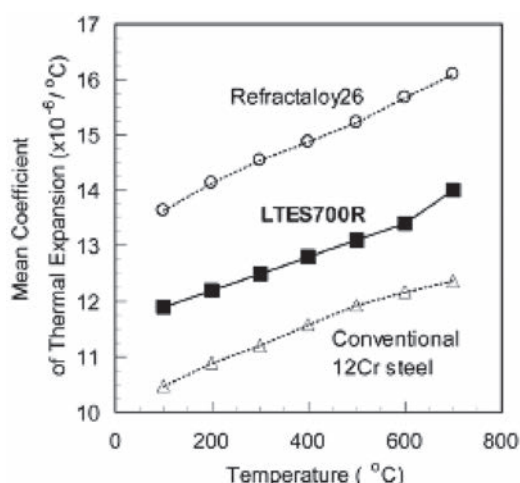


図7 LTES700R、Refractaloy26、12Cr耐熱鋼の線膨張係数

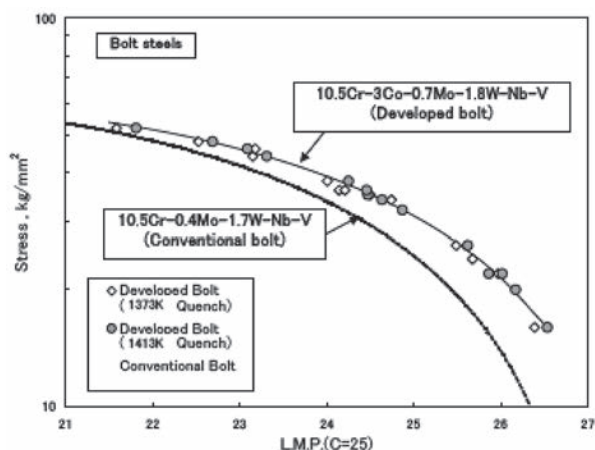


図8 改良鋼のクリープ強度特性

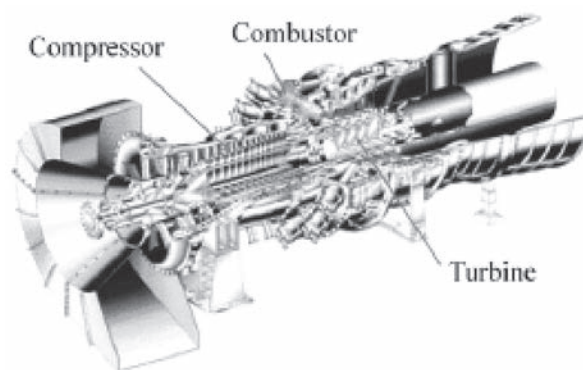


図9 大型ガスタービン断面図

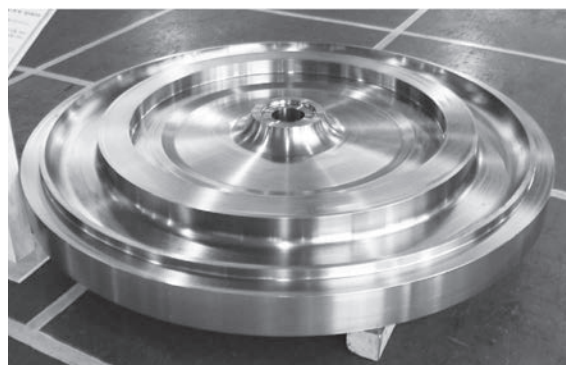


写真1 ガスタービン用コンプレッサーディスク

金は比較的サイズに制約のあるガスタービンに用いられることが多い。

Ni基耐熱合金によるローター材（主にディスク）は使用される温度が高く高速回転体であるため、その製品における材料特性の均質性が強く求められる。欠陥のない内質健全性は再溶解（VAR、ESR）における安定した溶解技術によるところが大きい一方、Ni基耐熱合金の機械的性質の均質性はオーステナイト結晶粒度の均一性に大きく左右され、これは鍛造技術の課題である。鍛造における歪付与と再結晶による結晶粒度の整細粒化を目的とし、Ni基耐熱合金ディスク材の製造においては超大型プレス（数万トン）による密閉鍛造（Closed Die Forge）が適用されるケースが多かったが一方、密閉鍛造は鍛造形状に対する型製作費用が大きいという欠点がある。ターンテーブルを使用した自由鍛造（Open die Forge）は、製造の自由度が高いが、金敷やターンテーブルの制御精度や再現性を上げるための課題があり、長く均一な整細粒ディスクを製造する技術を保証できないでいたが、昨今のプロセスモデリング技術を駆使し、要求される均一な内質を満足する製造条件を予測する技術が確立されている。図10は、Alloy718のディスク製造において結晶粒度を予測するフローチャートであり、これを利用しディスク形状で自由鍛造による結晶粒度を計算した結果が図11である。Alloy718ディスクの自由鍛造において、 δ プロセスを最適化した熱間加工スケジュールにより、安定的に、均質な結晶粒度を得られることができ、その粒径はASTM No.8以上であることが実際の鍛造材の破壊調査によって確認されている。

この技術は密閉鍛造に比べ小さなプレス加圧力で製造が可能で、型製作費用に影響されないため、小ロット対応や製造リードタイム短縮に優位な製造方法であり、他の合金も含めた展開が期待される。

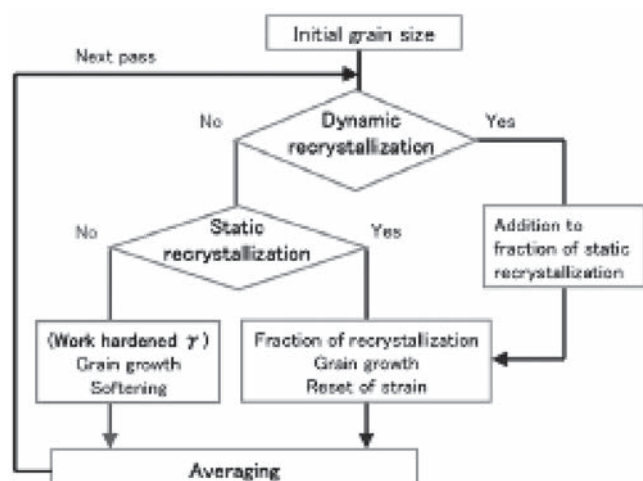


図10 Alloy718鍛造品における結晶粒度予測フローチャート

5 まとめ

鍛鋼品の分野においても新興メーカーの追い上げは激しく、製造が容易な炭素鋼、構造用鋼、一般ステンレス鋼においては既に競争力が低下しているが、本稿でまとめた製品群は製造において高い技術が必要であり、我が国の産業において欧州、米国の鍛鋼品メーカーと同様の競争力を有している分野である。

発電用プラントは今後更なる建設と、それに平行し効率化を目的とした技術革新が進むと考えられており、これに対応できる材料の改良、新材質開発、製造技術改良による競争力強化と材料性能の向上が強く求められている。我が国がこの分野での競争力を保ち、世界をリードするためには、プラントメーカー、大学等研究機関、公的機関、材料メーカーが一体となった技術開発を進めてゆく必要がある。国内鍛造品メーカーは発電プラントの高効率化ニーズに対応するため、より高強度・高耐熱材の材料開発と製造技術確立が今後ますます求められている。

参考文献

- 1) 石川浩一, 小柳禎彦, 植田茂紀: 電気製鋼, 83 (2012) 1, 53.
- 2) 徳川豊治: 電気製鋼, 83 (2012) 1, 77.
- 3) 竹山雅夫: 電気製鋼, 83 (2012) 1, 29.
- 4) 依田朋文, 大矢耕二, 神谷輝明: 電気製鋼, 80 (2009) 1, 119.
- 5) 古瀬泰輔, 佐久間仁, 犬飼富雄, 鶴田泰彦, 平川裕一, 角屋好邦, 馬越龍太郎, 河合久孝: 鋳鋼と鍛鋼, (2007)
- 6) 東北大学 プレスリリース, (2012.5.9)

(2013年10月8日受付)

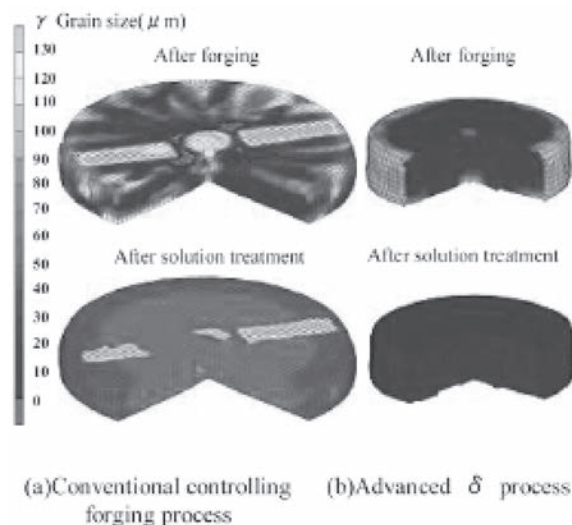


図11 Alloy718における従来プロセスと δ プロセス適用材の結晶粒度予測比較