

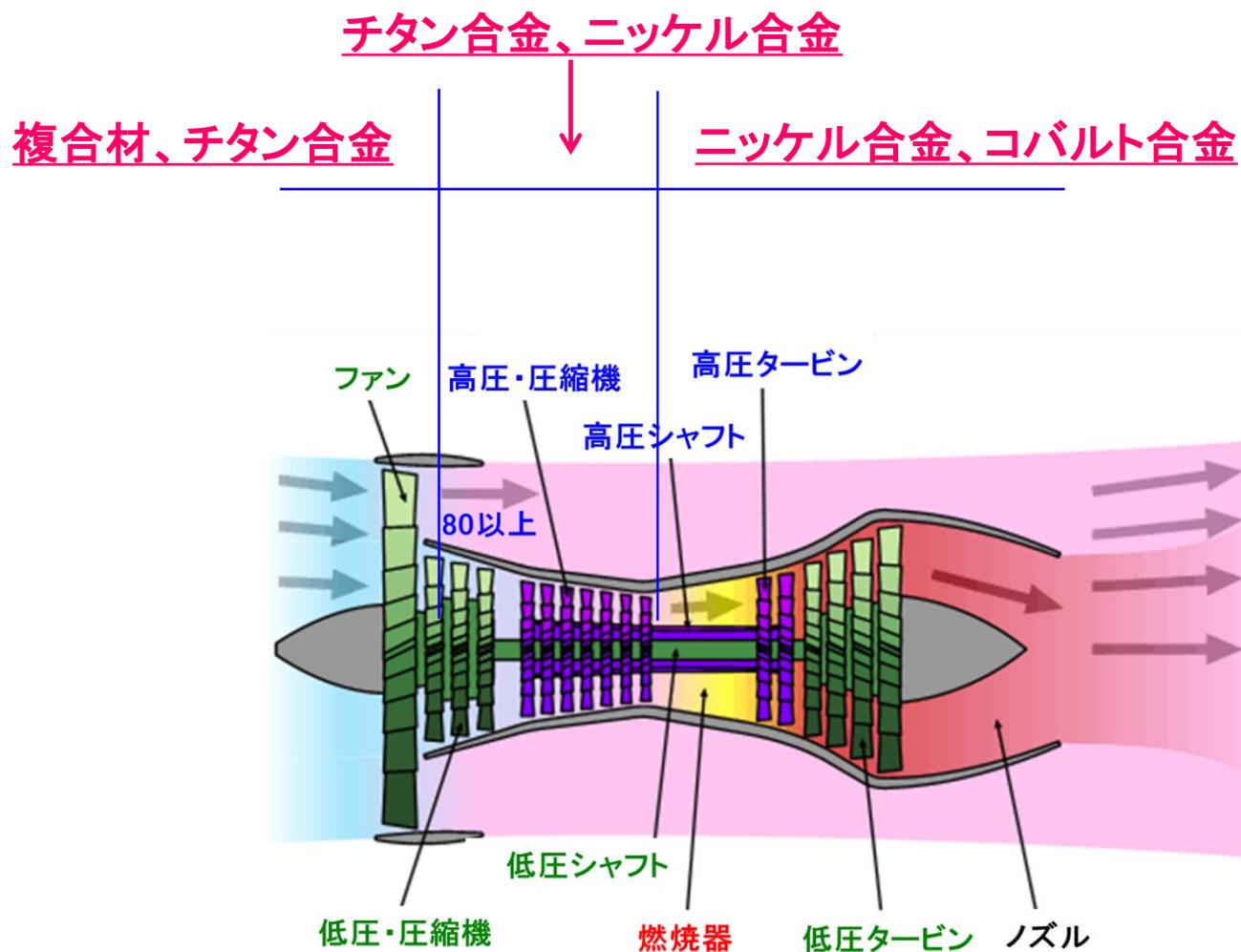
名古屋大学BP講座

航空機用エンジンの設計と製造 製造編

2020.12.12(土)

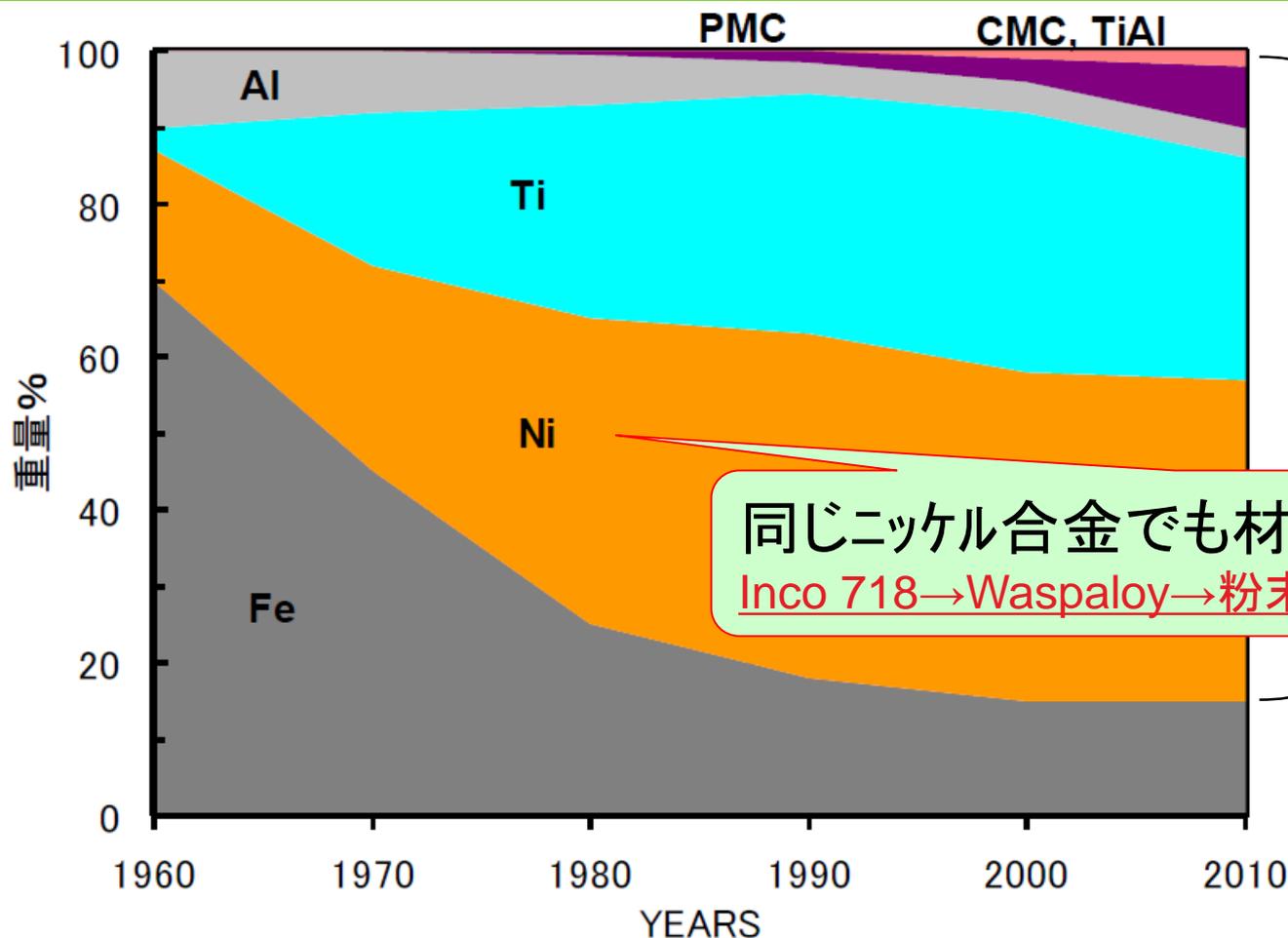
1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. 接合
6. 表面処理
7. 特殊工程
8. 複合材
9. 品質保証

航空エンジンの使用材料



航空エンジン使用材料の変遷

最新のエンジンではニッケル合金やチタン合金等の難削材が約70%



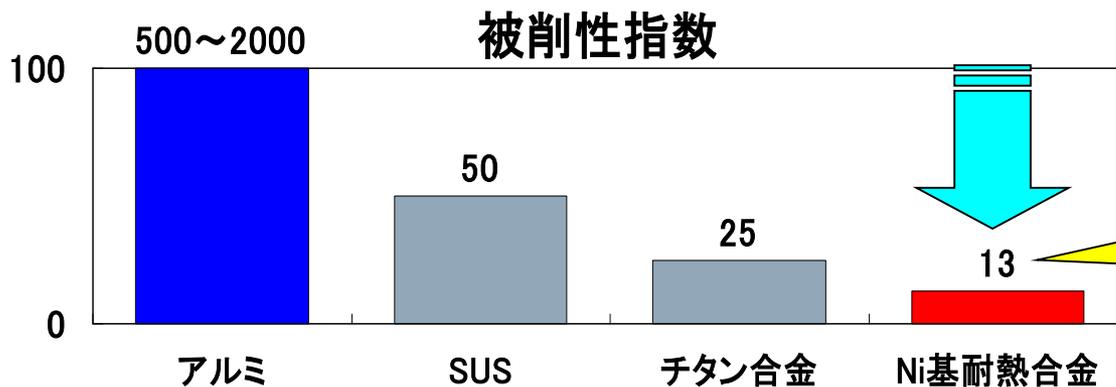
エンジン全般でチタン合金、ニッケル合金、新材料などの難削材が増加

同じニッケル合金でも材料が更に難削化
Inco 718→Waspaloy→粉末冶金材

PMC: Polymer Matrix Composites = FRP : Fiber Reinforced Plastics
CMC: Ceramic Matrix Composites

出典: (公財)航空機国際共同開発促進基金「航空エンジンにおけるレアメタルと非レアメタル化」2010年

1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. 接合
6. 表面処理
7. 特殊工程
8. 複合材
9. 品質保証



アルミと比較して
30倍以上削り難い
(工具が30倍磨耗)

ニッケル基耐熱合金を効率的に加工するかが勝負！



<アルミ>

切削速度
約1/40
送り速度
約1/120

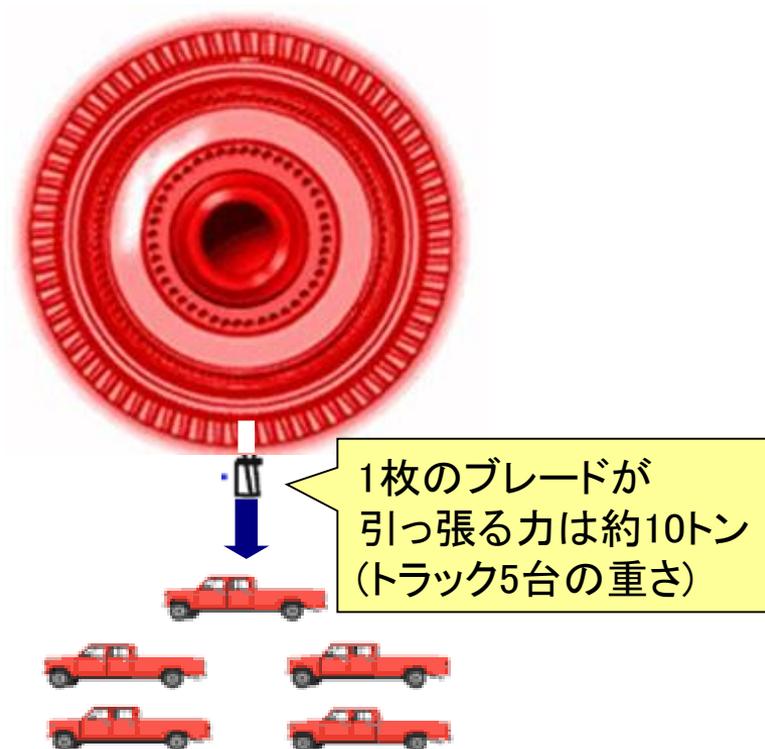


<インコネル718(Ni基耐熱合金)>

- ブレードを保持し、その力を受けてシャフトを回転させる
- 高温(～700℃)で高回転(10,000rpm以上)

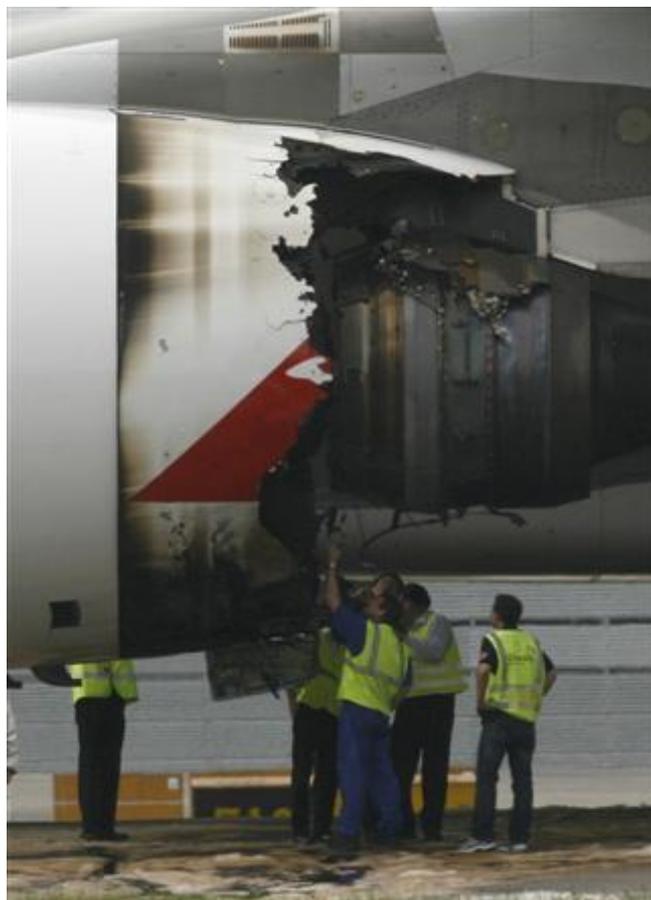


クリスマスツリー構造
(ディスクとブレードの固定)



運転中のディスクへの
負荷イメージ

Disk破損はコンテインメントできず⇒寿命管理(LLP)と厳格な工程管理



破損したエンジン



飛散したエンジン部品により損傷した翼

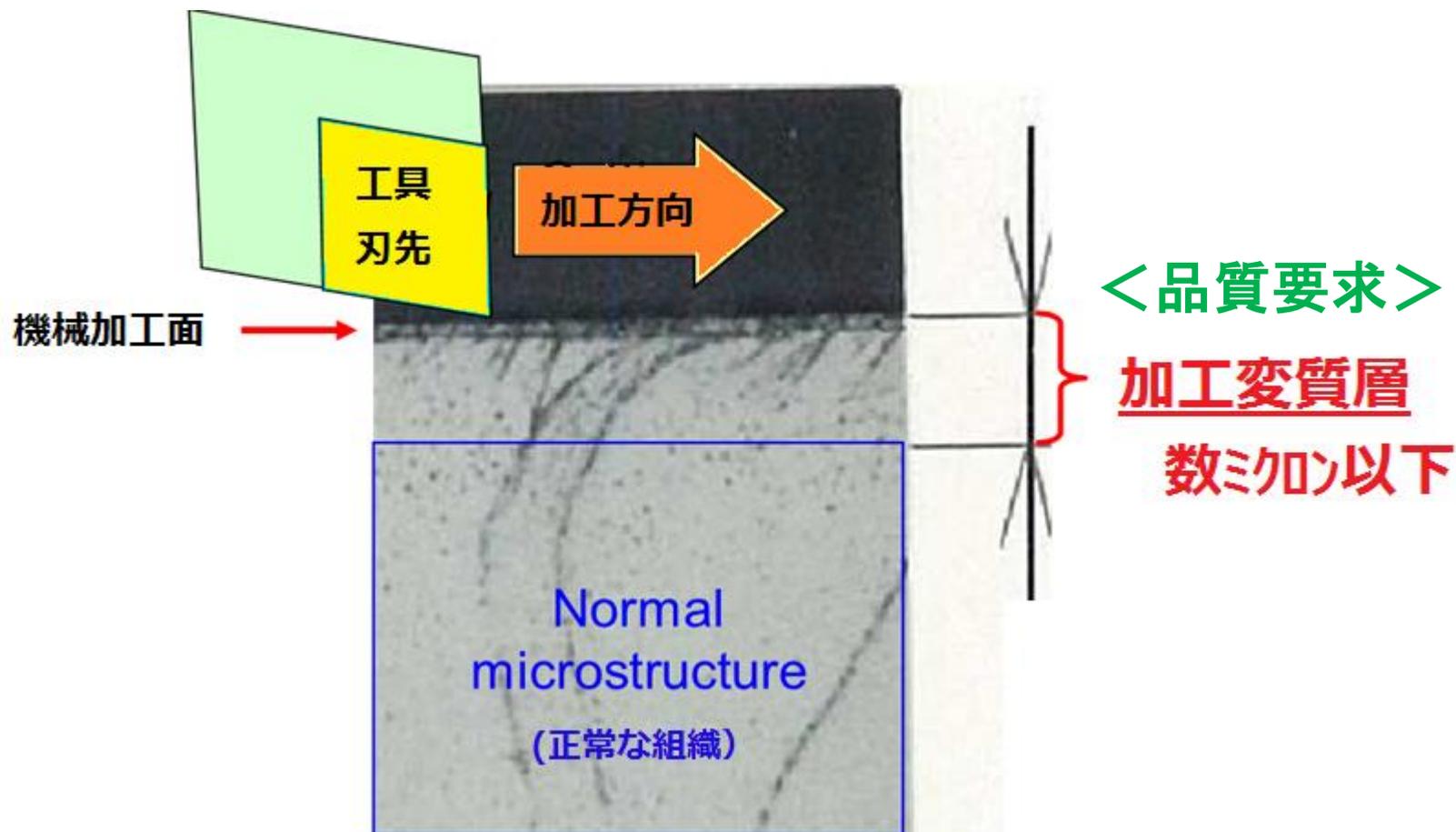


飛散した中圧タービンディスク

LLP:
Life Limited Parts

カンタス航空 QF32便事故(エアバスA380)2010年11月4日

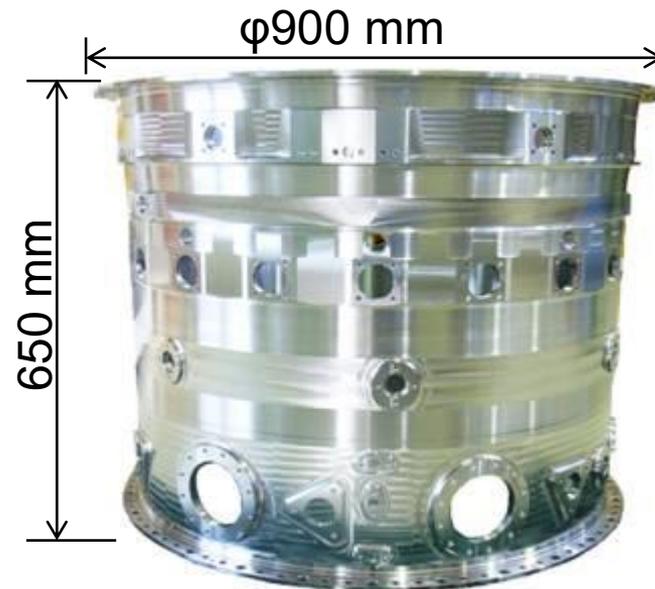
ディスク機械加工表面のマイクロ組織



- 燃焼器を包み込む耐圧容器
- 高温強度(600°C、40気圧)、信頼性
 - ニッケル基耐熱合金(難削材)から削り出し・・・加工時間 / 工具費 大
 - 大物薄肉部品・・・加工歪を考慮した製造技術



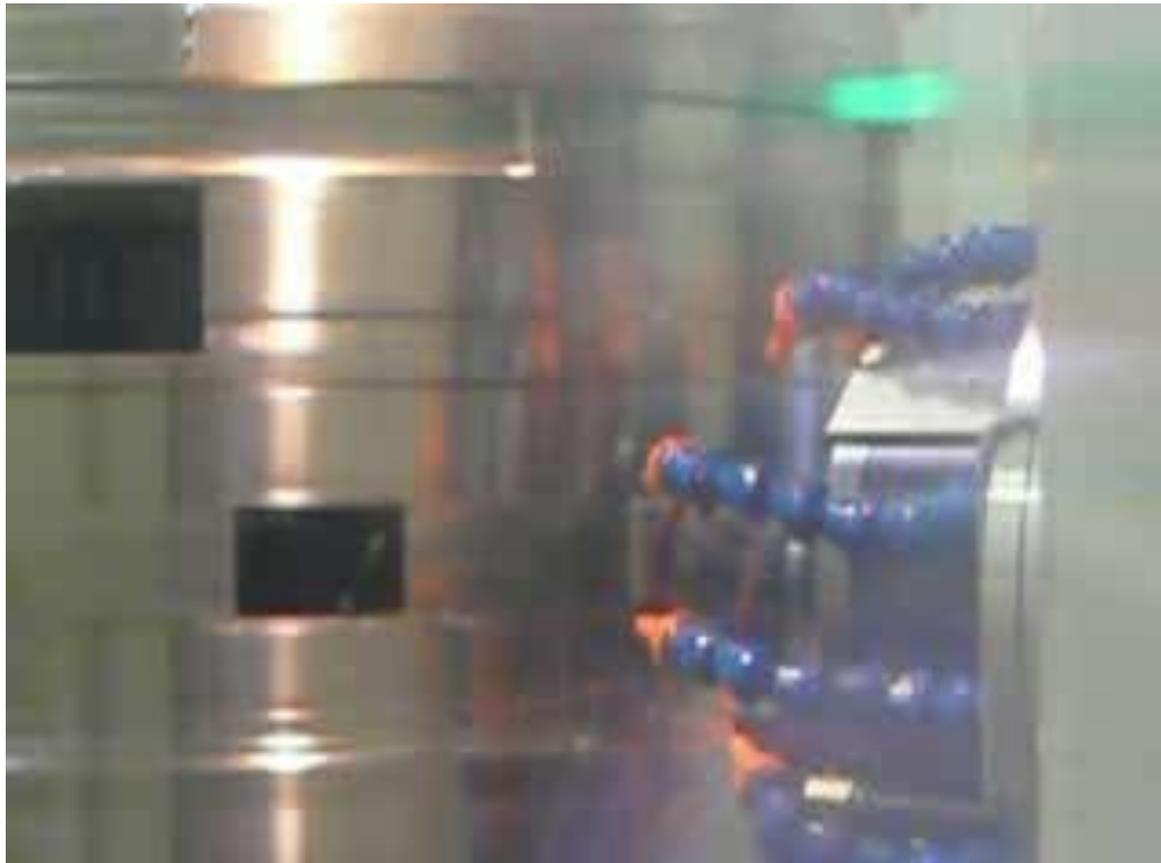
<素材>
重量: 320kg



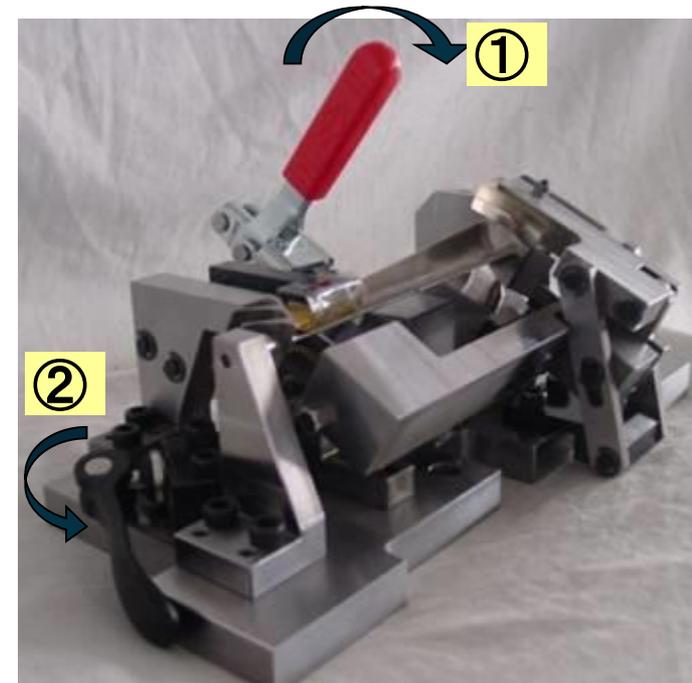
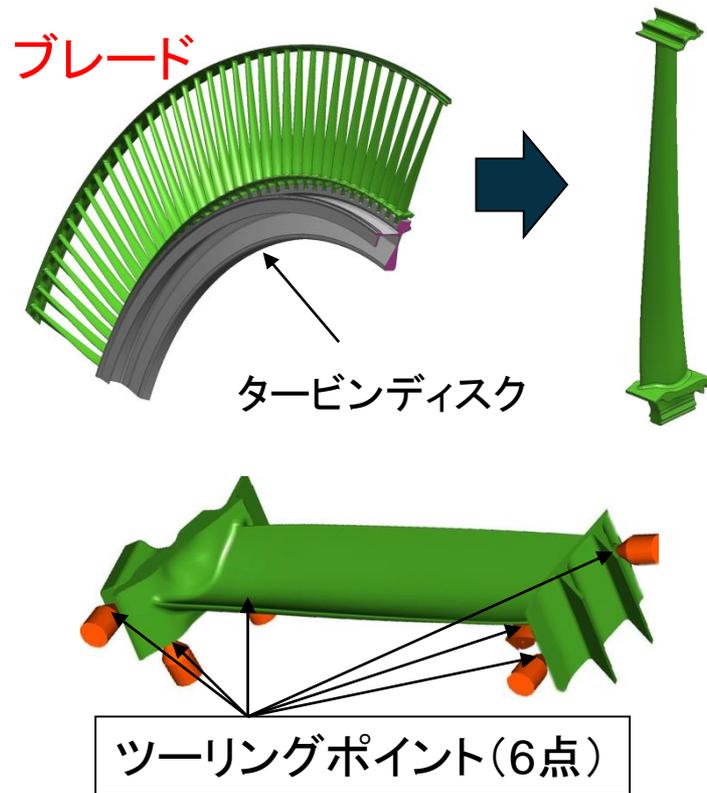
<製品>
重量: 90kg

約7割を除去

- 高温(1,000°C以上)に耐えるセラミック工具により高速切削
 - 最適な工具材質と加工条件の導出
 - 工具に負荷をかけない加工パスの最適化

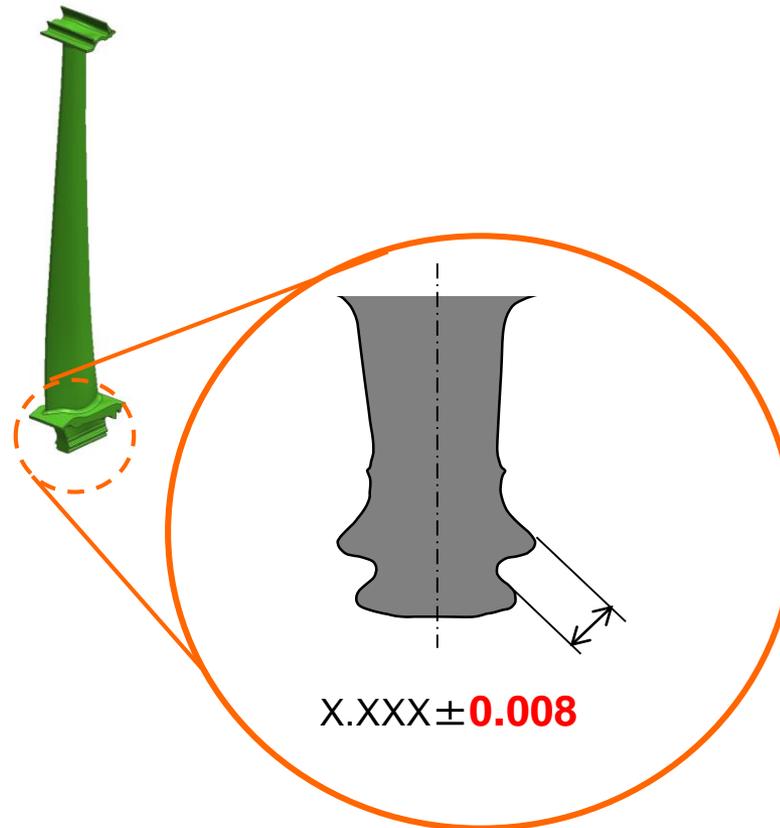


- 燃焼ガスから運動エネルギー（回転）を取り出す動翼
- 薄肉素材で低剛性、鑄肌基準でワーク拘束力低下
 - ワークを歪ませず、加工負荷にも耐え、取り付け簡単な治具の開発



2ステップ取り付け治具

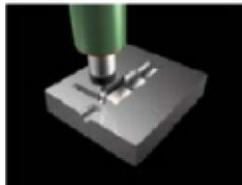
- 生産数が多く(1000枚/台)、短時間での高精度加工
(寸法公差 $\pm 8 \mu\text{m}$)が必要



1. エンジン材料
2. 加工技術
3. **鋳造**
4. 鍛造
5. 接合
6. 表面処理
7. 特殊工程
8. 複合材
9. 品質保証



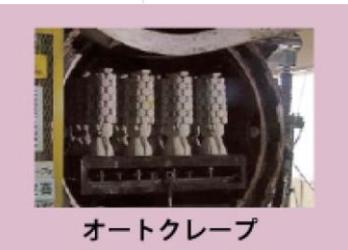
● 金型設計
Tooling Design



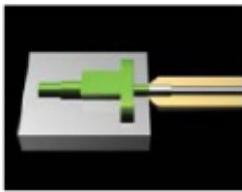
● 金型製作
Tooling Manufacturing



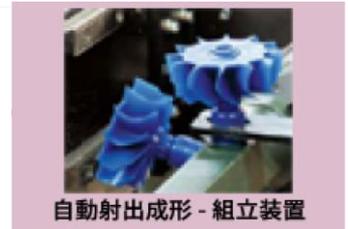
● 脱ロウ
Dewaxing



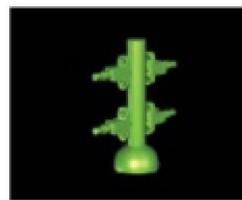
● 鑄造
Casting



● ワックス
模型成形
Waxing
Manufacturing



● 型ばらし
Mold Removal
● 熱処理
Heat Treatment



● 組立
Assembly



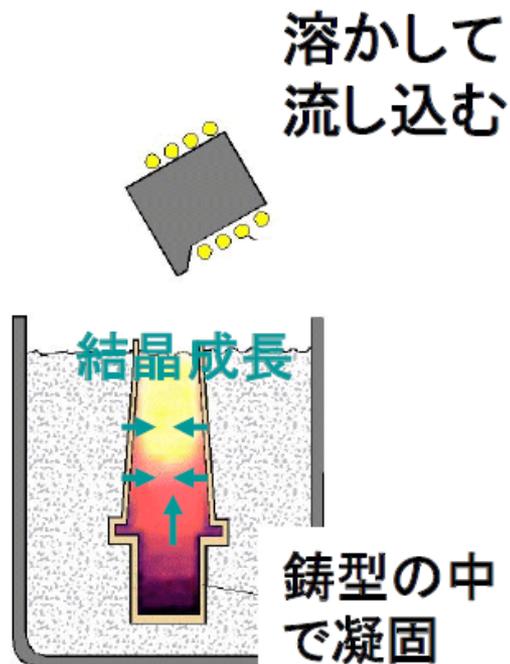
● 検査
Inspection



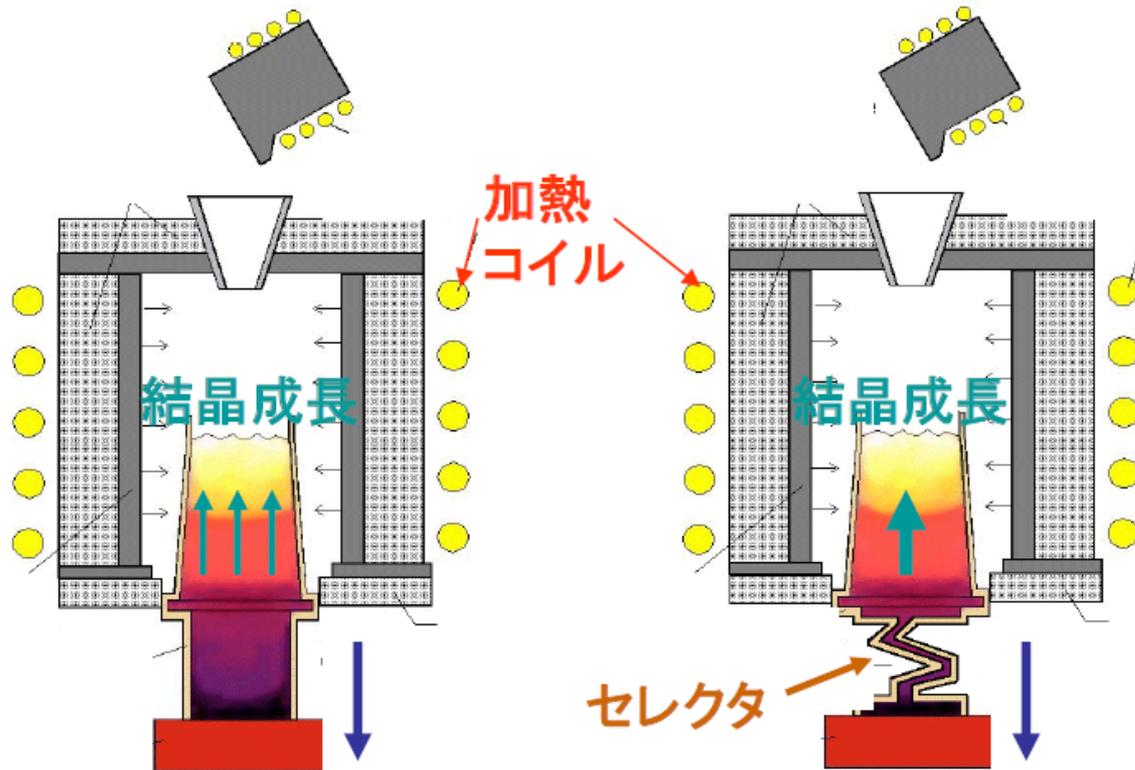
● コーティング
Coating



普通鑄造



一方向凝固



単結晶凝固

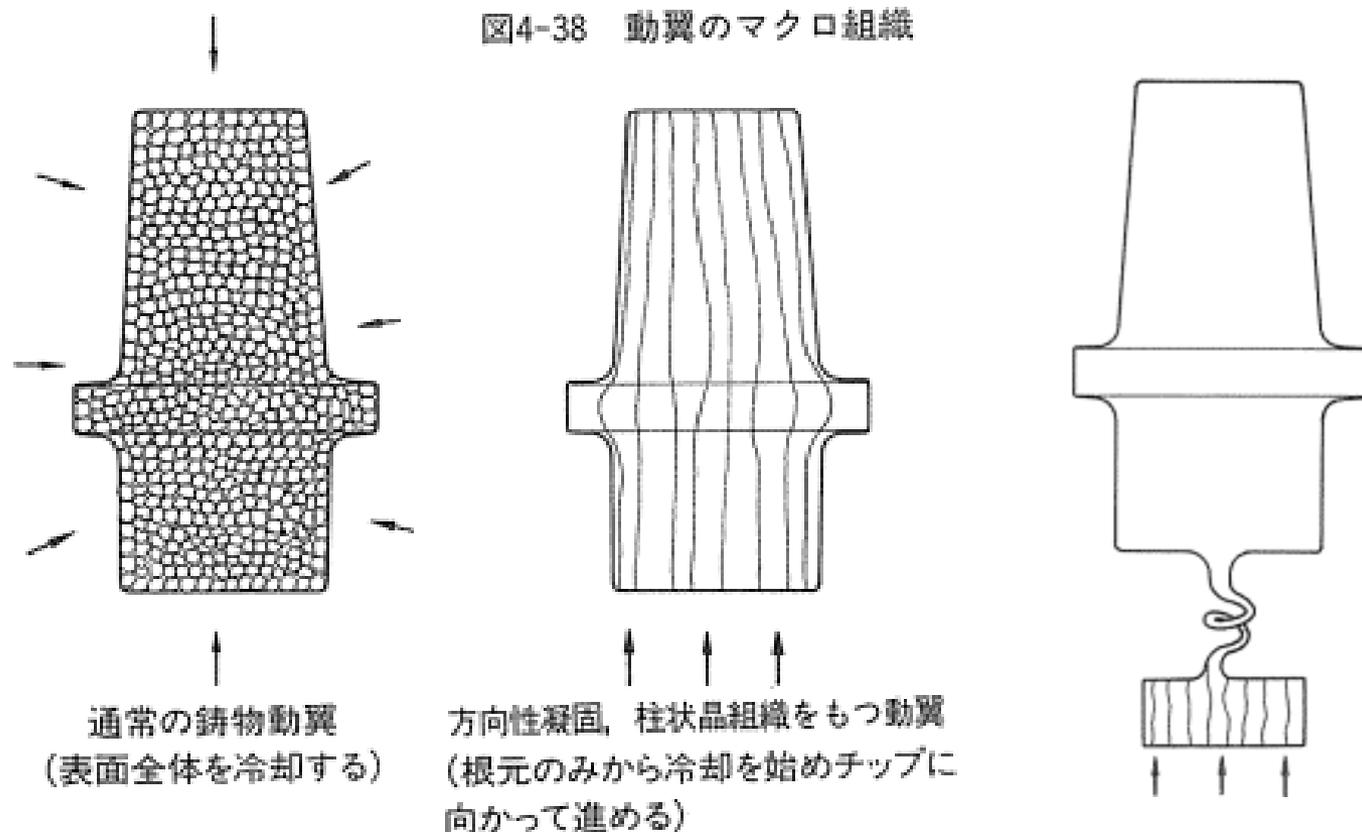
セレクトタ

下端を冷やししながら徐々に引き抜く

[http:// www.nistep.go.jp/conference/nt100422/pdf/05harada.pdf](http://www.nistep.go.jp/conference/nt100422/pdf/05harada.pdf)

温度勾配や冷却速度の制御で熔融金属の凝固をコントロール

⇒半径方向の結晶粒界をなくすことで半径方向のクリープ強度を向上



複雑な冷却構造はセラミックコアで実現

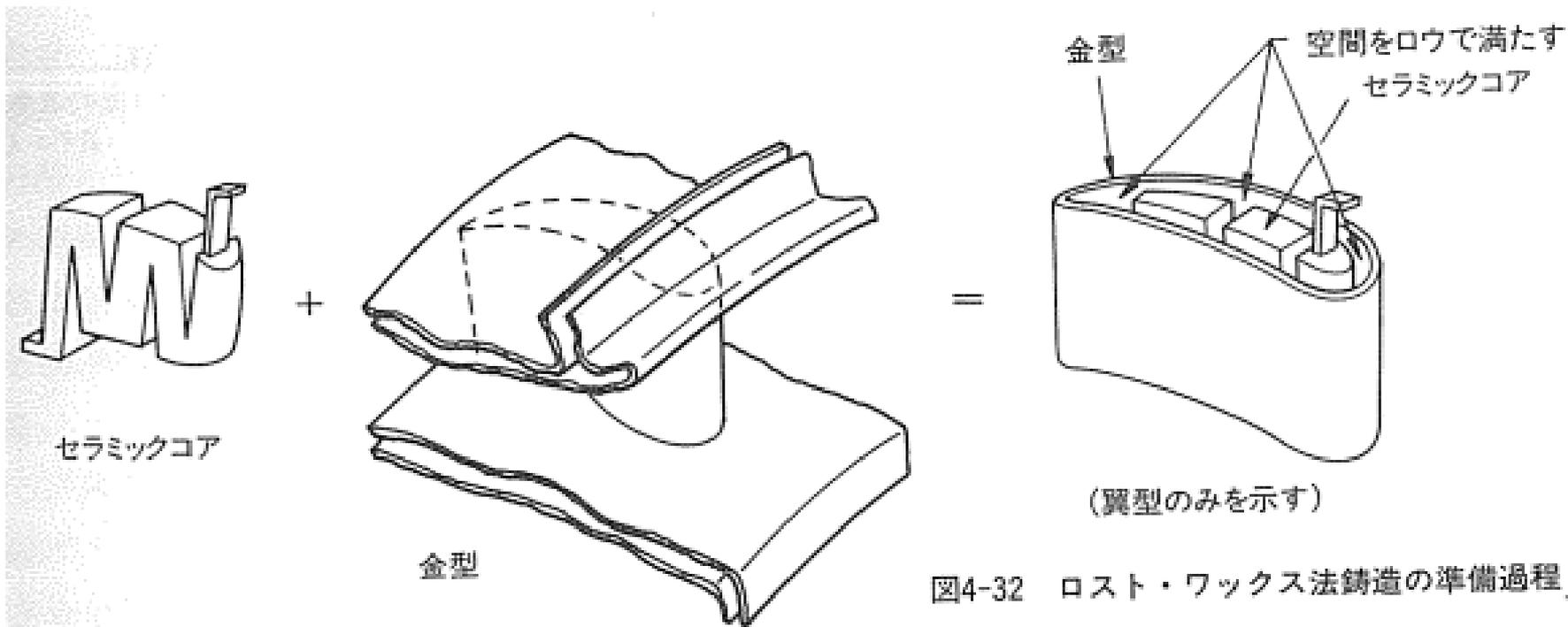
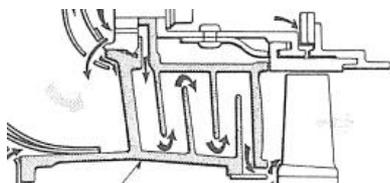


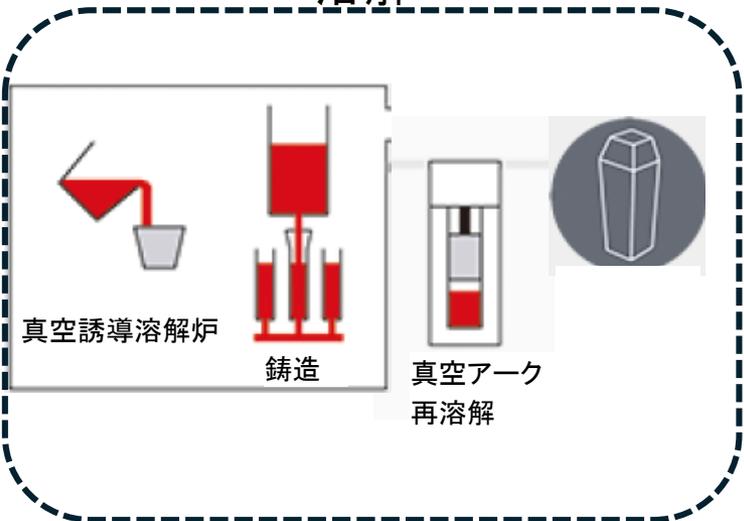
図4-32 ロスト・ワックス法鋳造の準備過程



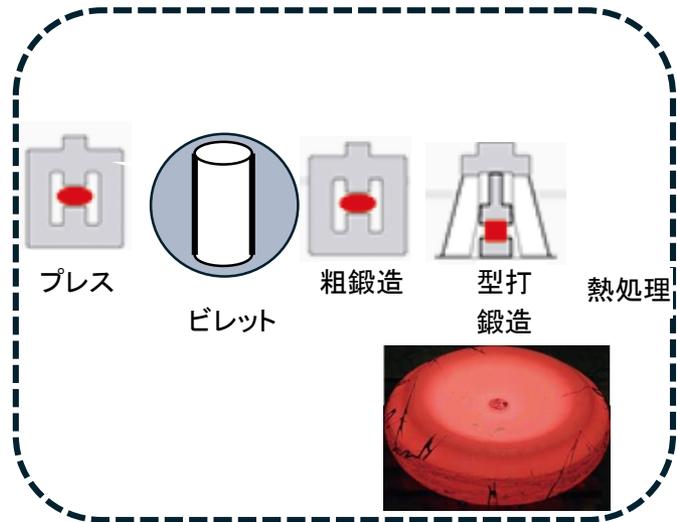
1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
- 4. 鍛造**
5. 接合
6. 表面処理
7. 特殊工程
8. 複合材
9. 品質保証

型鍛造一回転体のディスクや圧力ケースの素材

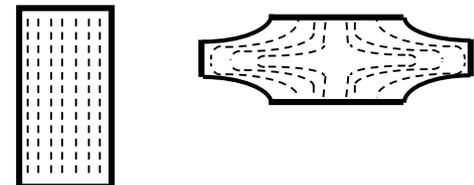
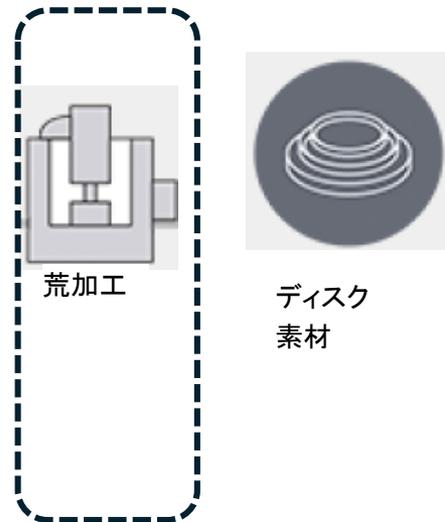
溶解



熱間加工



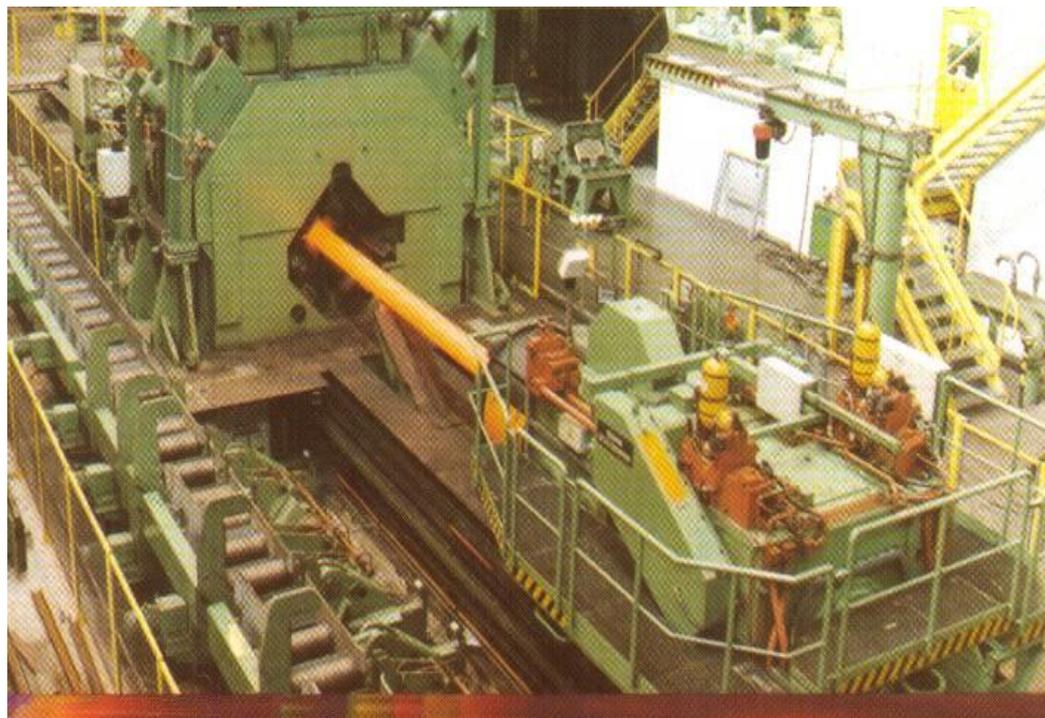
冷間加工



型打鍛造によるグレんフローの変化・グレんのコントロール
結晶粒の細分化でLCF強度向上



鍛造プレス



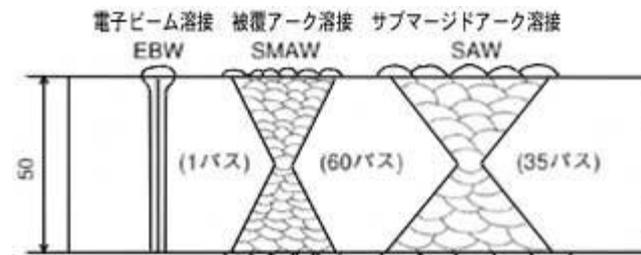
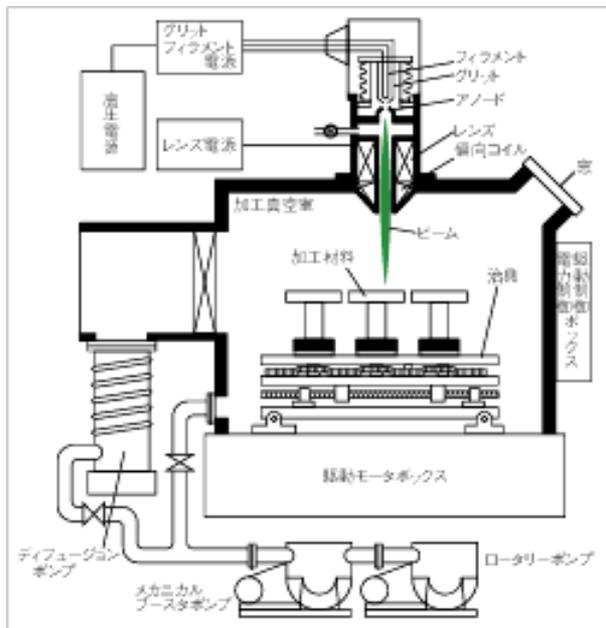
高速鍛造プレス



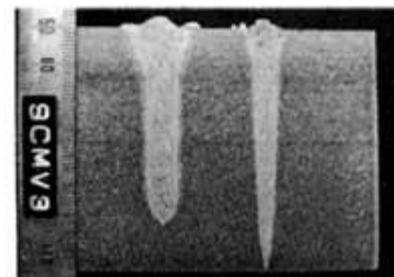
リング鍛造 圧力ケースの素材

1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. **接合**
6. 表面処理
7. 特殊工程
8. 複合材
9. 品質保証

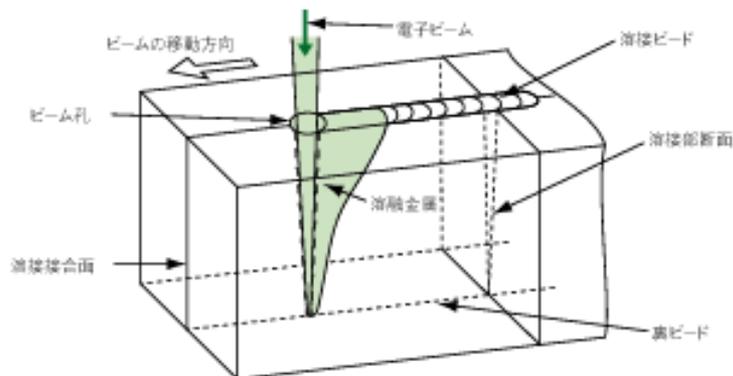
Electron Beam Welding (EBW:電子ビーム溶接)



各溶接法の開先形状とパス数の比較

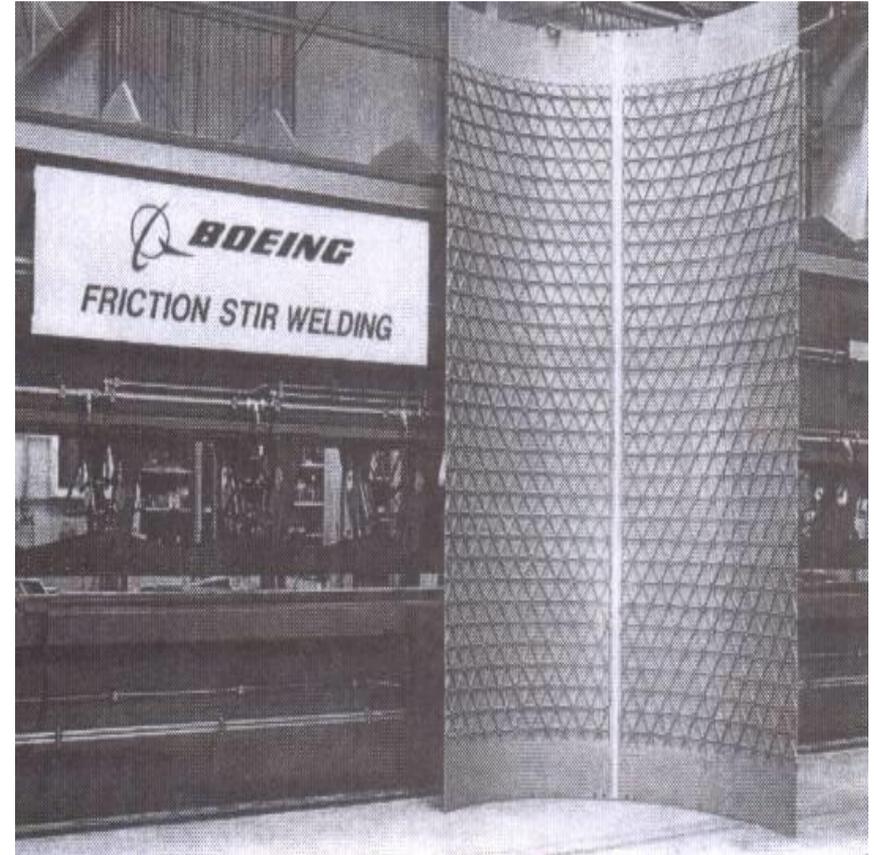
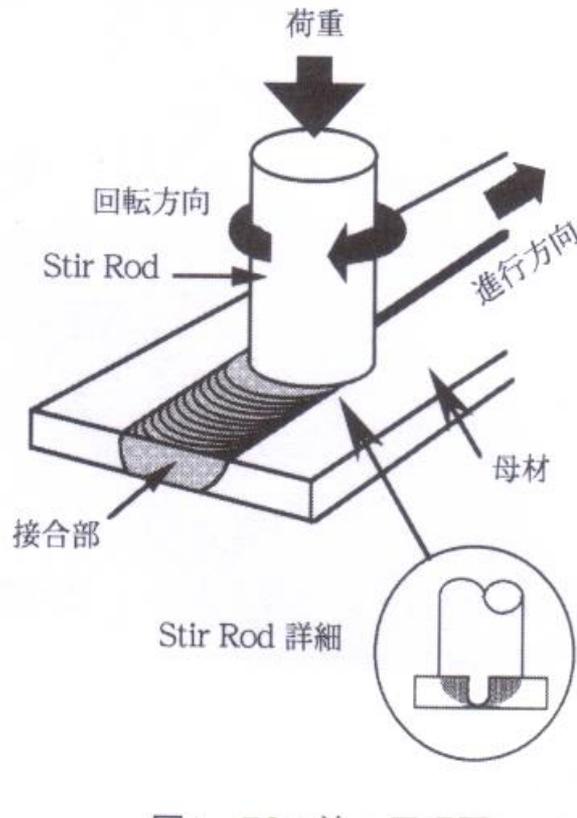


EBWによる深い溶込みマクロ組織



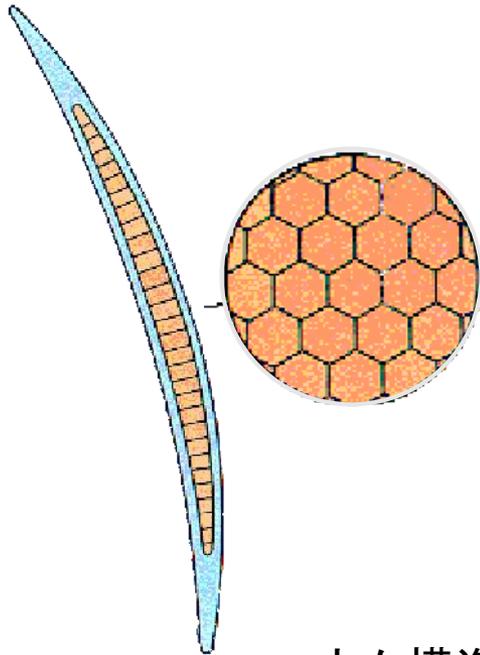
- ・深溶込み可能
- ・真空チャンバー必要
- ・高品質溶接可能

Friction Stir Welding (FSW:摩擦攪拌接合)



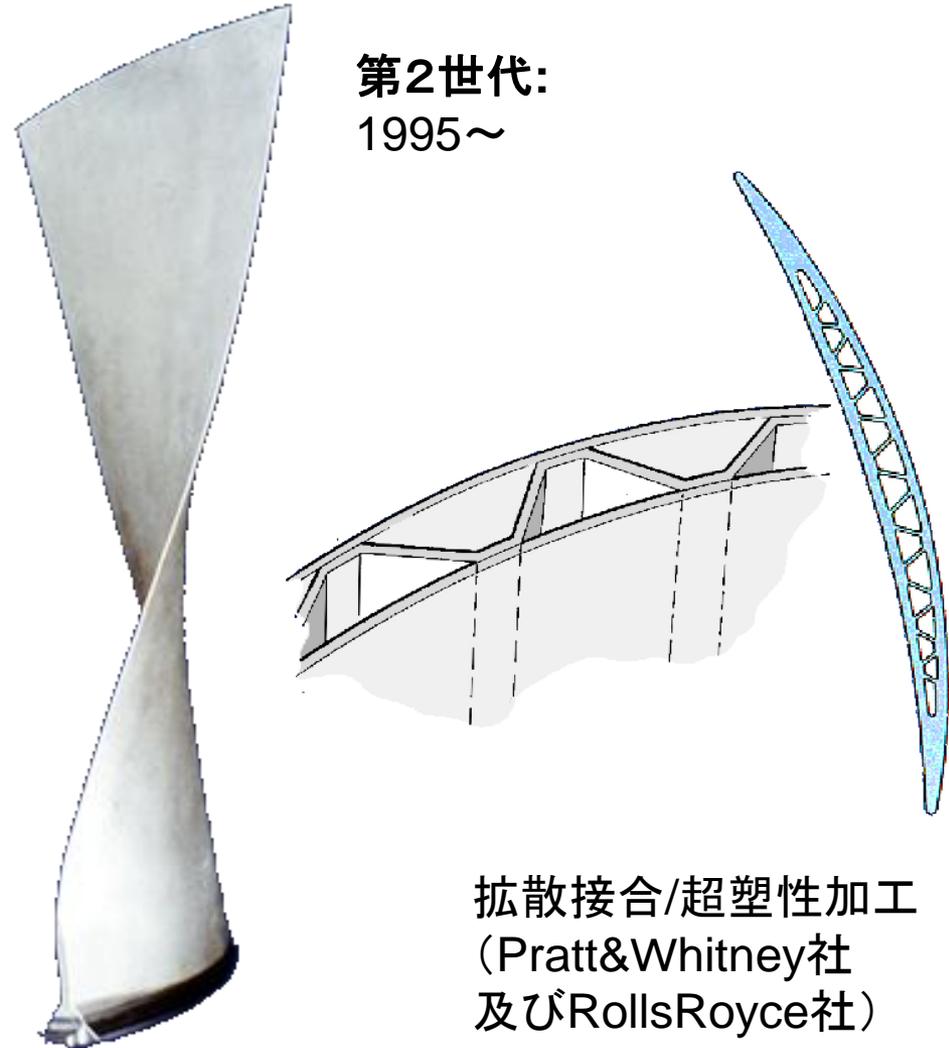
ロケット燃料タンクの接合

第1世代:
1984～

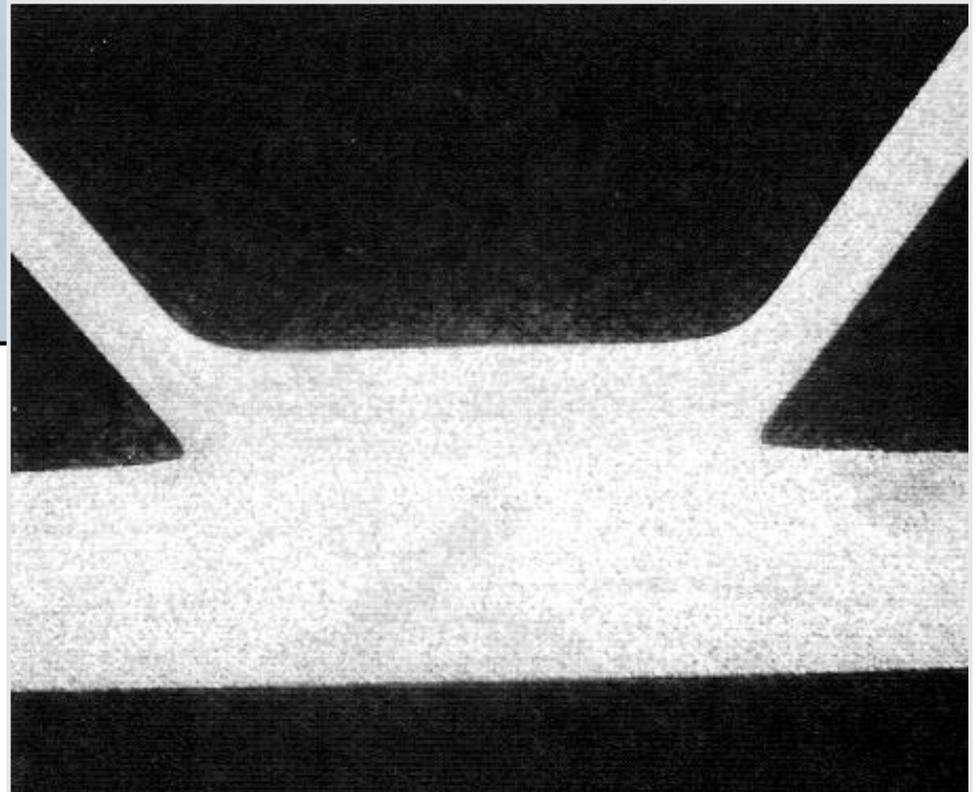
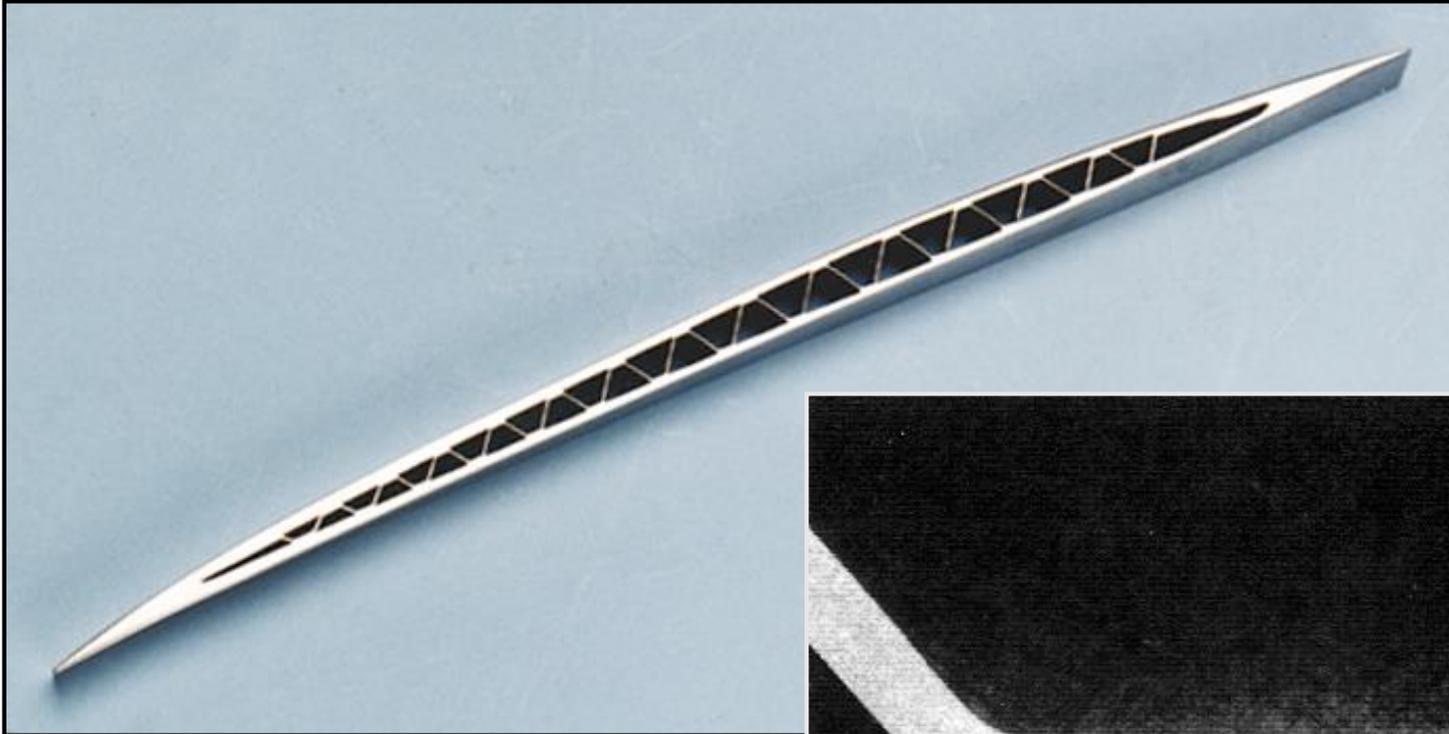


ハニカム構造
(RollsRoyce社)

第2世代:
1995～



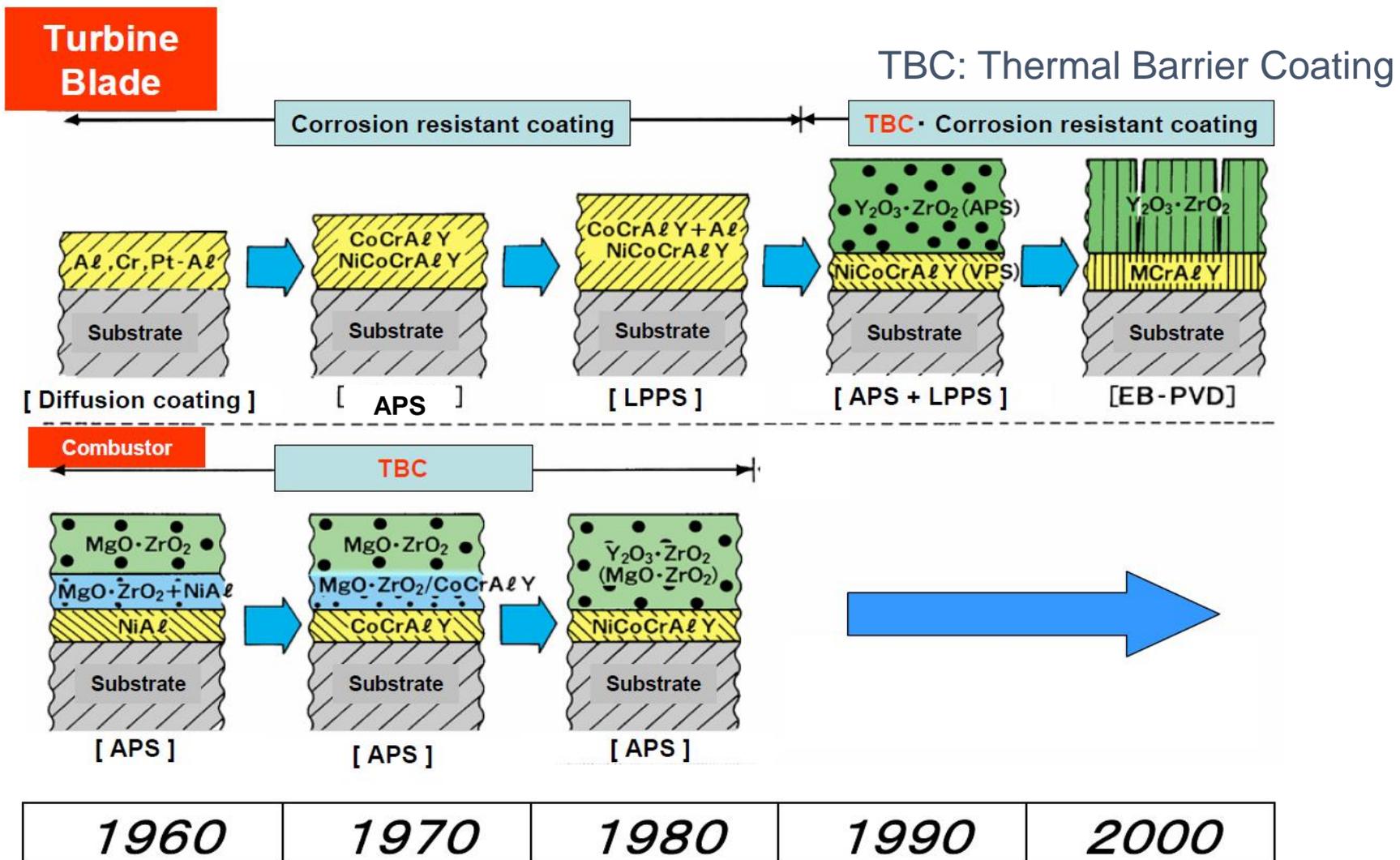
拡散接合/超塑性加工
(Pratt&Whitney社
及びRollsRoyce社)

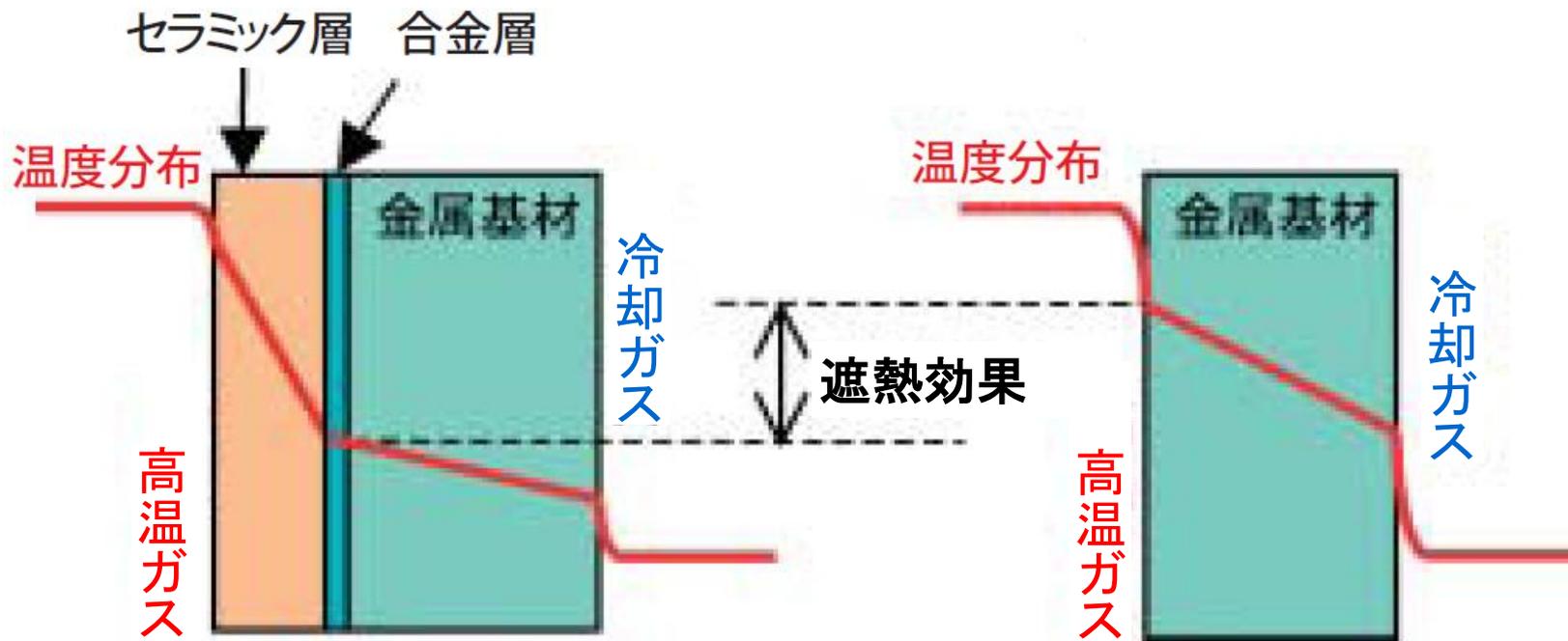


拡散接合/超塑性加工
(Pratt&Whitney社
及びRollsRoyce社)

1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. 接合
- 6. 表面処理**
7. 特殊工程
8. 複合材
9. 品質保証

タービン入り口温度上昇にとって遮熱コーティング(TBC)も重要技術





TBCの概念図

冷却されている金属基材表面に低熱伝導のセラミックス層を形成することにより遮熱効果を得る

⇒断熱構造 + 熱対流冷却

1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. 接合
6. 表面処理
7. **特殊工程**
8. 複合材
9. 品質保証

**「結果として得られる製品の適合が容易に、
または、経済的に検証できないプロセスの
こと。」(ISO 9000規格3.4.1項)**

具体例

熱処理、ショットピーニング

溶接、ろう付、はんだ付、溶射、

めっき、表面処理

清浄度要求

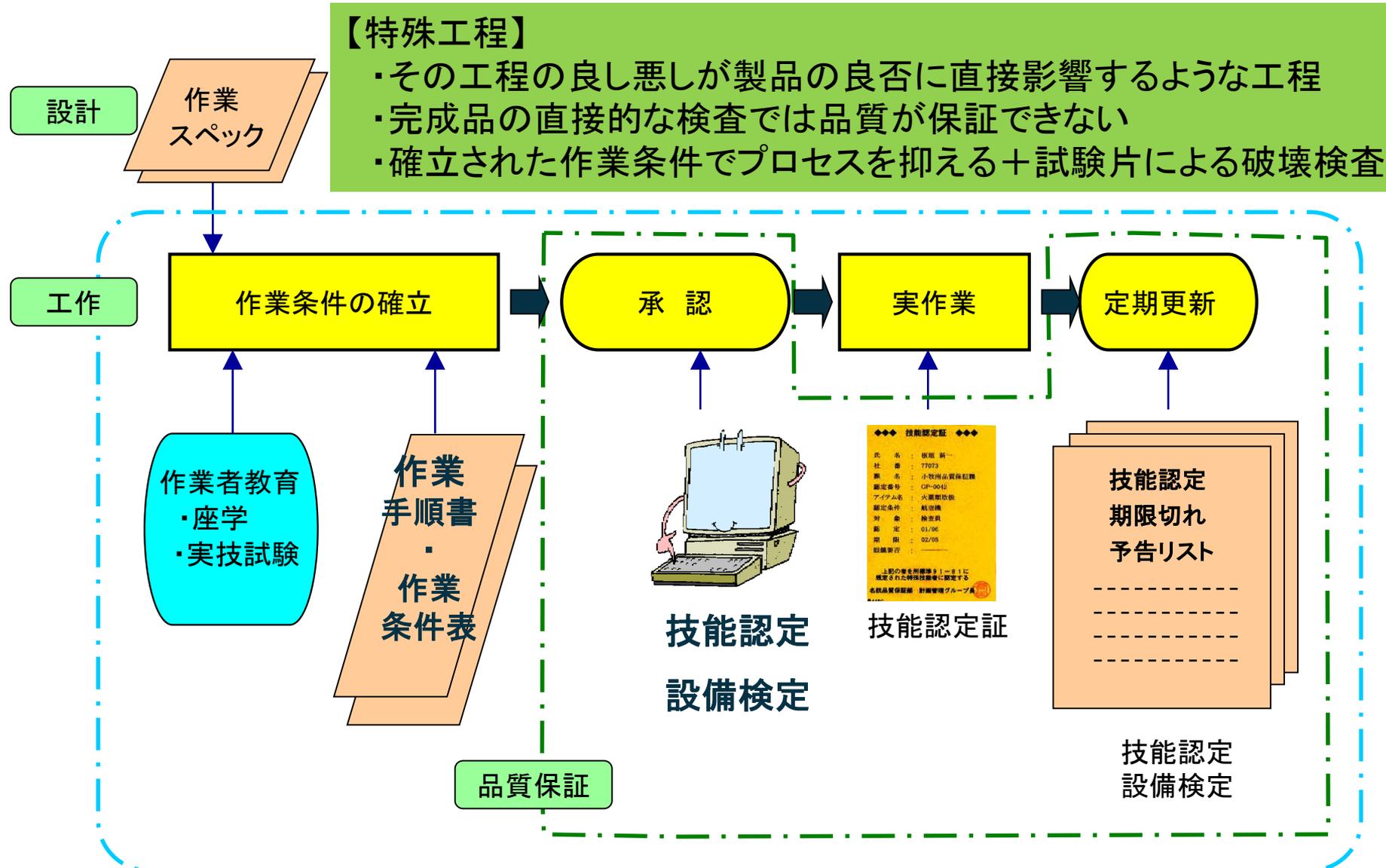
非破壊検査(RT、UT、PT、MT)

RT: X線検査

UT: 超音波検査

PT: 浸透探傷検査

MT: 磁粉検査



1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. 接合
6. 表面処理
7. 特殊工程
- 8. 複合材**
9. 品質保証

- ・GE社がGE90にて世界で初めて実用化
- ・Polymer Matrix Composites (PMC)
- ・前縁にチタン合金貼付
 - ∴鳥衝突時の衝撃強度確保
- ・重量700lb低減

PMC と Ti6Al4V の特性比較		
	PMC	Ti6Al4V
比重 g/cm ³	1.56	4.45
耐熱温度 °C	150	320
引張強度@20°C MPa	1480	950
動翼相対重量 %	55	100



出典: ge_webcast_presentation

GEの複合材料エンジン部品

GE90-94B
777-200ER

GE90-115B
777-200LR, -300ER, 777F

GE9x
787, 747-8

GE9X
Boeing 777X



- Wide chord design
22 blades

- Swept aero
22 blades

- Improved efficiency
18 blades

- Improved materials
16 blades

2020 fan blade
EXPERIENCE
100+
million flight hours

**Extending
to fan cases**

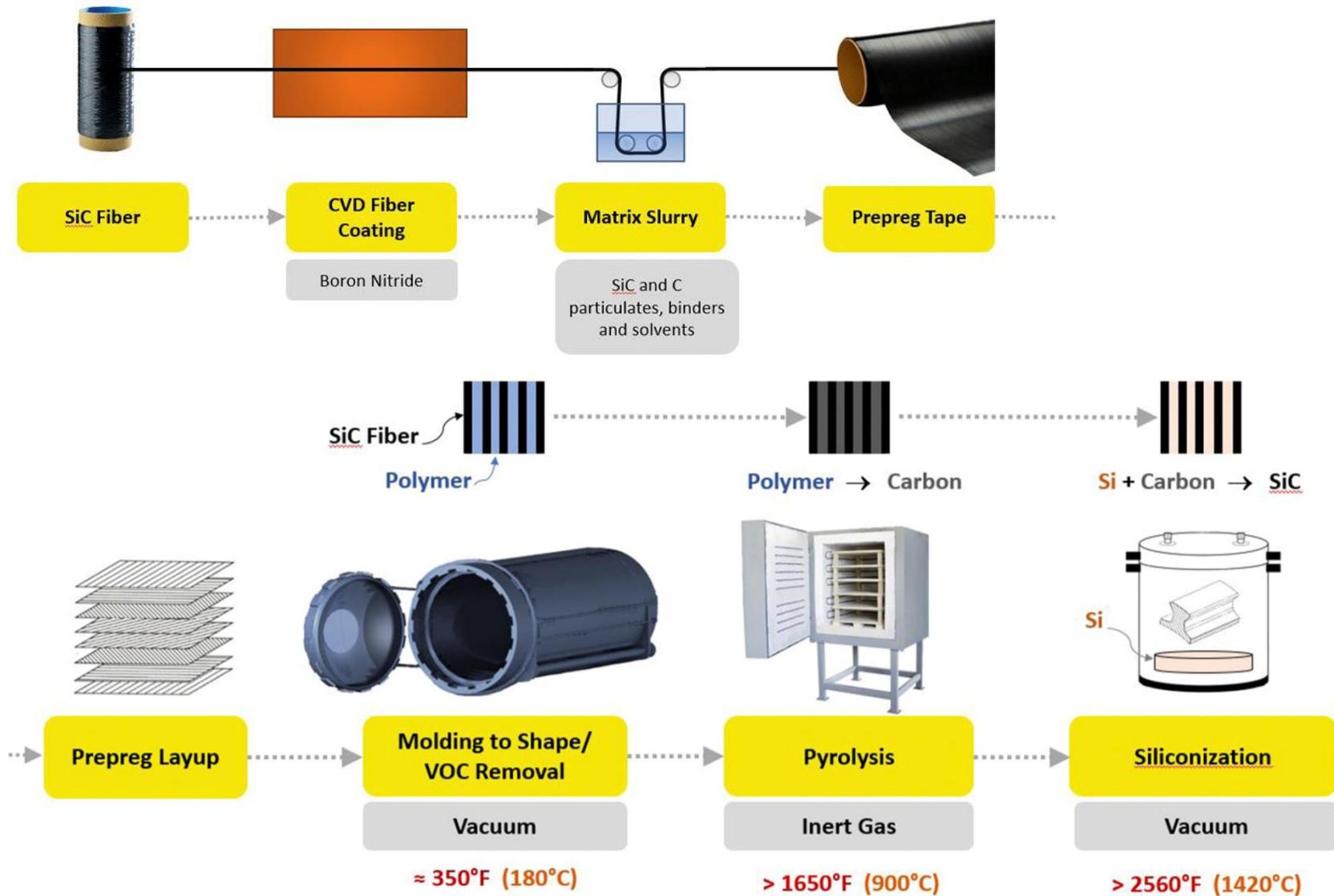
- Integrated structure
- Saves 700+ lbs per aircraft on 787



- ・ファンブレード、ファンケースに実用化
- ・形状、材質の改善

出典: ge_webcast_presentation

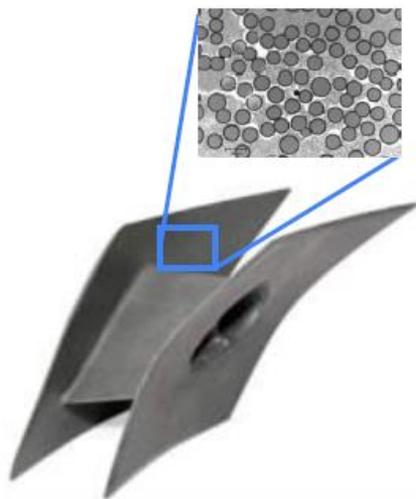
CMC (Ceramic Matrix Composites) の製法例



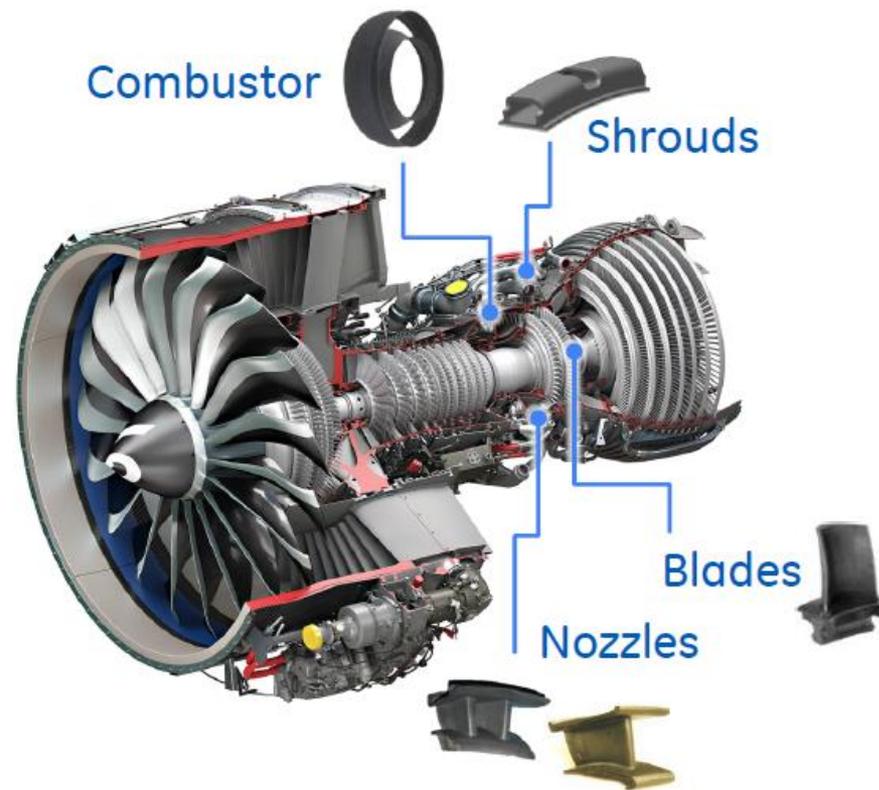
<https://www.compositesworld.com/blog/post/the-next-generation-of-ceramic-matrix-composites>

Ceramic-matrix composites (CMC) ... next generation of innovation

CMCs are silicon carbide fibers in a silicon carbide matrix



● Diameter of a human hair



2,400°F 500°F hotter than metal + **1/3** weight of metal = better fuel efficiency

Ceramic-matrix ... only GE

2.3 M Hours

by 2019

Revenue service



GE9X



LEAP

Research

1980

2000

Product Development

2016

2020



1st GENERATION 2nd GENERATION 3rd GENERATION



GE Power Turbine shroud



Aviation HPT shroud



Aviation HPT nozzles and blades



GE Frame 7



GENx and T700



ADVENT and F414

1. エンジン材料
2. 加工技術
3. 鋳造
4. 鍛造
5. 接合
6. 表面処理
7. 特殊工程
8. 複合材
- 9. 品質保証**

航空宇宙の品質保証の特徴

1. 品質マネジメントシステム(QMS)

JIS Q 9100

2. Nadcap

(National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program)

⇒航空宇宙分野の仕事をするのに必要な免許証

JIS Q 9100

品質マネジメントシステムー 航空,宇宙及び防衛分野の組織に対する要求事項

- 航空宇宙産業の国際的に共通な品質マネジメントシステム規格
- JIS Q 9100(日本) = AS9100(米国) = EN9100(欧州)

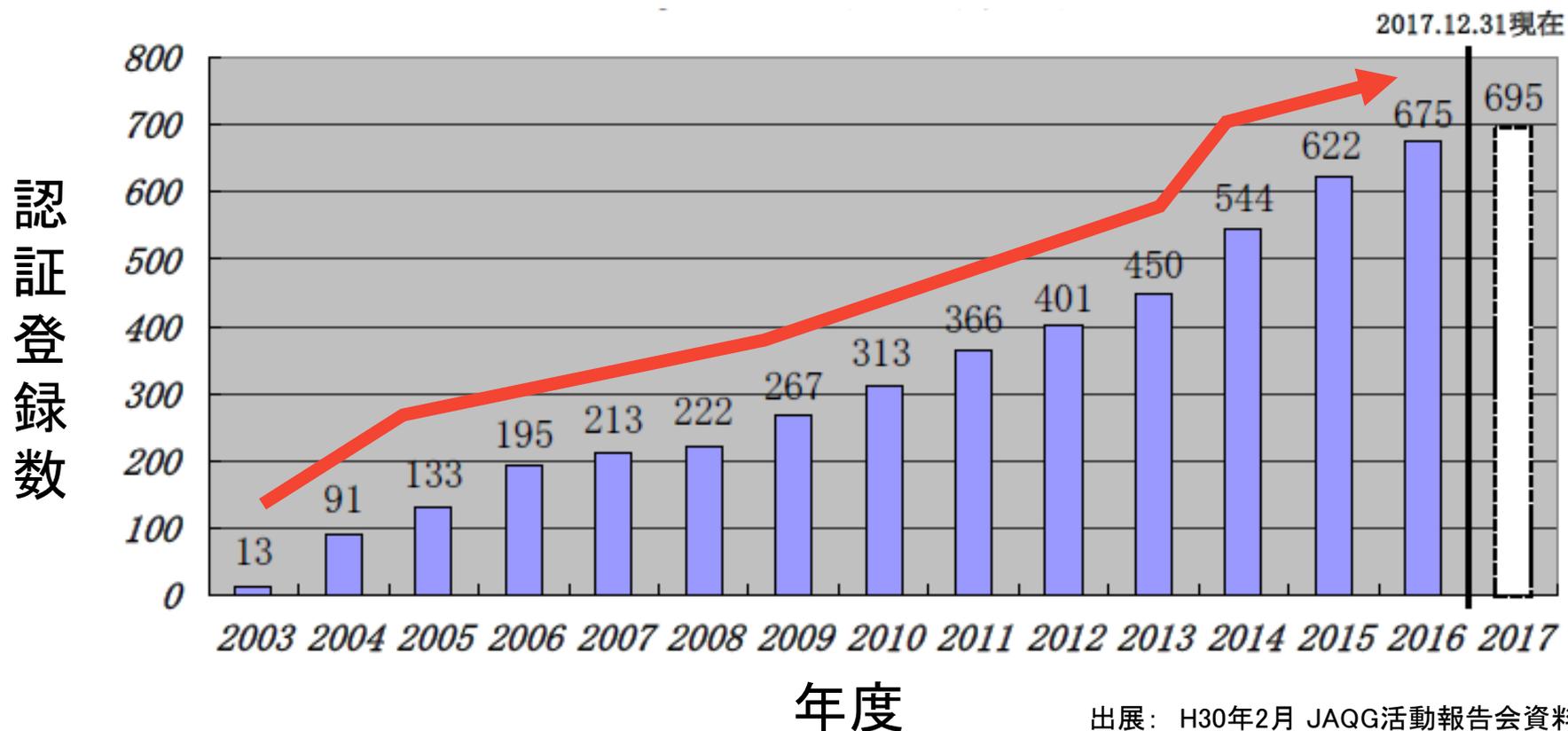
JIS Q 9001 との関係

JIS Q 9100 = JIS Q 9001 + 航空宇宙要求事項

JIS Q 9001:品質マネジメントシステム-要求事項 = ISO9001

- ・ISOとは国際標準化機構 (International Organization for Standardization)のこと。
- ・ISO9000シリーズは品質に関する国際規格

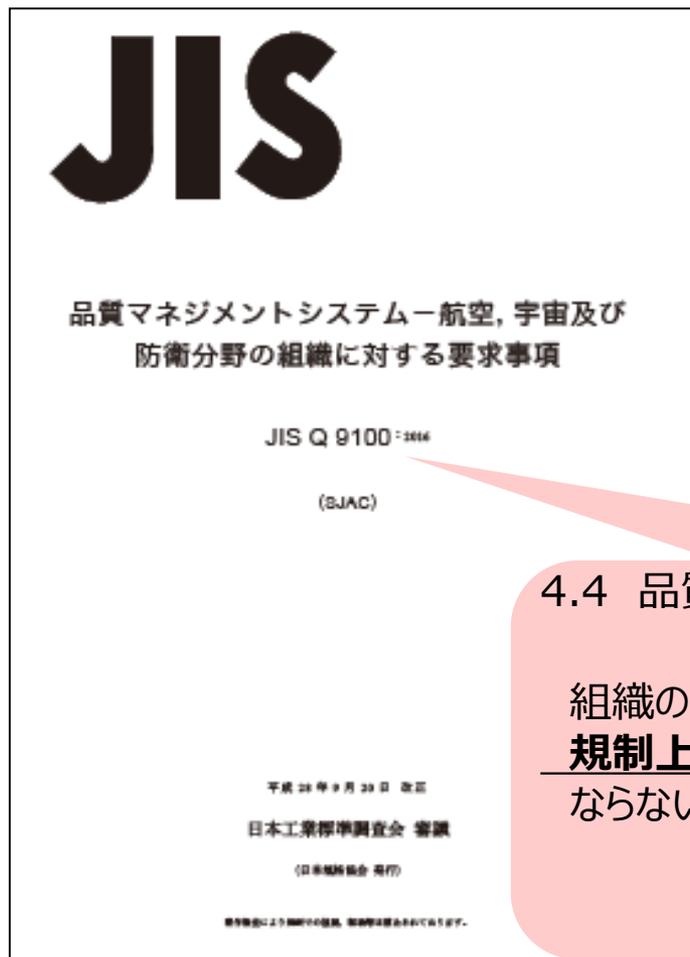
JIS Q 9100 取得の推移(国内)



今後もJIS Q 9100 取得事業所の増加は堅調

JIS Q 9100は航空業界の品質マネジメントシステム（QMS）に対する要求事項

JIS Q 9100:2016表紙



JIS Q 9100 = JIS Q 9001 + α

α : 航空業界固有の厳しい要求
例)

- : 顧客重視
- : 運用リスクマネジメント
- : 模倣品の防止
- : 特殊工程の管理
- : 不適合管理

4.4 品質マネジメントシステム及びそのプロセス

組織の品質マネジメントシステムは、顧客及び適用される法令・規制上の品質マネジメントシステム要求事項も取り扱わなければならない。

- 1 一般
- 2 品質マネジメントの原則
- 3 プロセスアプローチ

- 3 用語及び定義
- 4 組織の状況
 - 4.1 組織及びその状況の理解
 - 4.2 利害関係者のニーズ及び期待の理解

- 5 リーダーシップ
 - 5.1 リーダーシップ及びコミットメント
 - 5.1.2 顧客重視
 - 5.2.1 品質方針の確立
 - 5.2.2 品質方針の伝達

- 6 計画
 - 6.1 リスク及び機会への取組

- 7 支援
 - 7.1.3 インフラストラクチャ
 - 7.1.5 監視及び測定のための資源
 - 7.1.5.2 測定のトレーサビリティ
 - 7.1.6 組織の知識
 - 7.2 力量
 - 7.3 認識
 - 7.5 文書化した情報

8 運用

8.1.1 運用リスクマネジメント

8.1.2 形態管理（コンフィギュレーションマネージメント）

8.1.3 製品安全

8.1.4 模倣品の防止

8.2 製品及びサービスに関する要求事項

8.3 製品及びサービスの設計・開発

8.4 外部から提供されるプロセス、製品及びサービスの管理

8.5 製品及びサービスの管理

8.5.1.1 設備、治工具及びソフトウェアプログラムの管理

8.5.1.2 特殊工程の妥当性確認及び管理

8.5.2 識別及びトレーサビリティ

8.6 製品及びサービスのリリース

8.7 不適合なアウトプットの管理

9 パフォーマンス評価

9.2 内部監査

9.3 マネジメントレビュー

10. 改善

10.2 不適合及び是正処置

10.3 継続的改善

何を要求しているか？

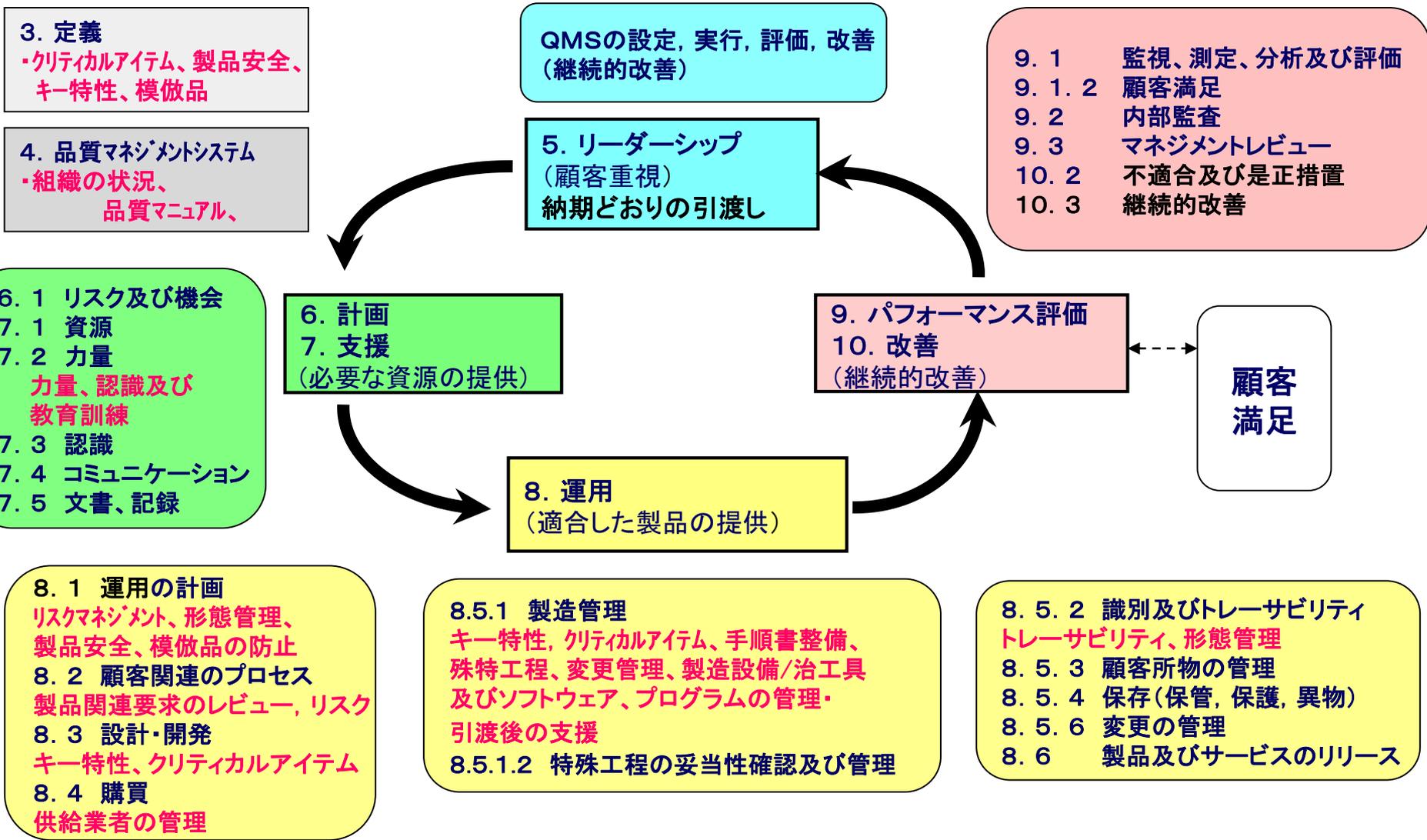
JIS Q 9100 4. 品質マネジメントシステム 4.1一般要求事項より

組織は、この規格の要求事項に従って、品質マネジメントシステムを確立し、文書化し、実施し、維持しなければならない。また、その品質マネジメントシステムの有効性を継続的に改善しなければならない。

この基本要求を実現するために実施すべきこと

- a. 必要なプロセスを明確にする
- b. プロセスの順序及び相互関係を明確にする
- c. プロセスの運用に必要な判断基準及び方法を明確にする
- d. プロセスの実行に必要な資源、情報を提供する（人、物、金）
- e. プロセスを監視、測定及び分析する
- f. プロセスの更なる成果を得るため継続的に改善をする

JIS Q 9100 概要



8.7 不適合なアウトプットの管理

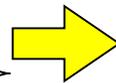
「品質要求に合致しない製品が誤って使用されたり、納入されることを防ぐため、**識別管理**しなければならない。」

以下の処置をする。

- ・検出された不適合を**除去するための処置**
- ・**封じ込めの処置**を取る。
- ・**特別採用**によって 使用、リリース又は合格と判定する。
- ・それ以外は、**廃棄**する。
- ・引渡し後に発見された場合は、不適合による影響に対して適切な処置を取る。
- ・**廃却するときには、使えない状態に壊して廃却**すること。
- ・**模倣品**又は**模倣品の疑いのある部品**は、
サプライチェーンへの**再混入を防止**するために管理

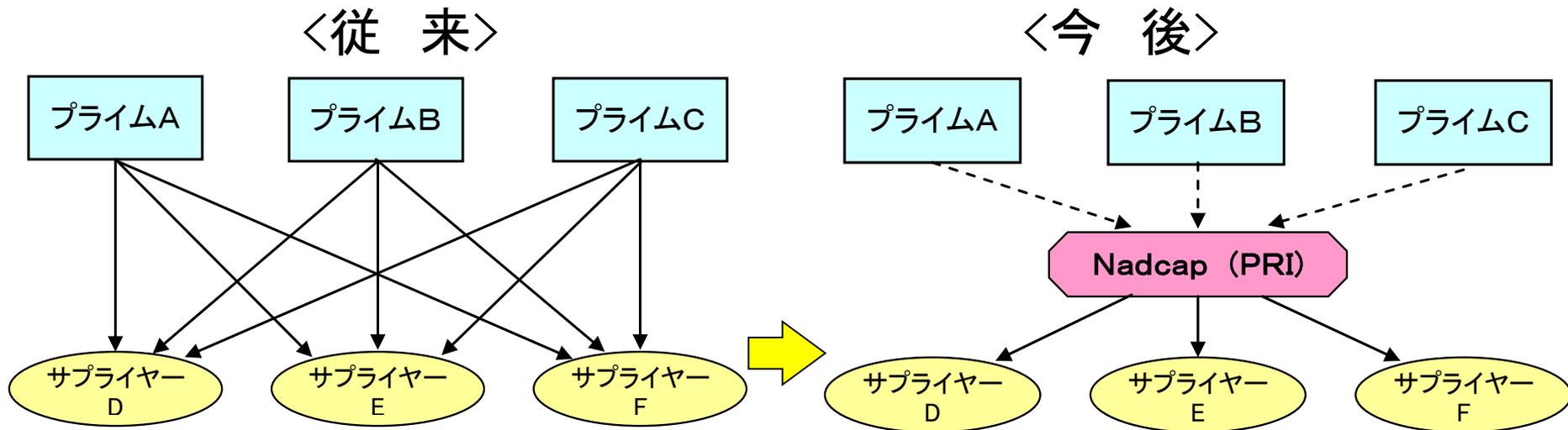
- National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program
- 航空業界プライム・メーカー*が参画し、特殊工程の認証機関であるPRI(Performance Review Institute)を設立し、そのPRIが作った特殊工程を対象とした国際的な認証システムである。

- * ・Pratt & Whitney
- ・Rolls-Royce
- ・GE Aircraft Engines
- ・The Boeing Company
- ・AIRBUS 等



国際的な要求として、
特殊工程のNadcap認証取得を
全てのサプライヤに対して要求

- 従来は、プライム・メーカーが、サプライヤ毎に個別に認証しなければならない等、非効率であった為、特殊工程のスペシャリストの認証機関であるPRIにより一括認証することで、効率化と品質向上を図ることを目的としたもの。



- ① 認定監査員による専門的な監査の実施
- ② 共通の監査判定基準*¹で監査を実施
(総合的合意に基づく認証基準を開発)
- ③ 重複監査の削減
- ④ 監査費用*²が必要
- ⑤ 公用語は英語(手順書の英文化、英語による監査)

*1 監査基準

非破壊検査 (AS7114)
熱処理 (AS7102)
化学処理 (AS7108)
コーティング (AS7109)
溶接 (AS7110)
特殊加工 (AS7116)
表面改質 (AS7117)
金属評価試験 (AS7101) 等

AS: Aerospace Standard

*2 監査費用

監査期間: 2~5日
監査費用: \$4200~5600
認証期限: 12~24ヶ月

当初は12ヶ月の認証期限。
その後の更新審査で問題なければ、
「メリット・プログラム」が適用され、
18ヶ月→24ヶ月と認証期限が延長。



SCOPE OF ACCREDITATION

NonDestructive Testing

Mitsubishi Heavy Industries
1200 Higashi-Tanaka
Komaki-Shi Aichi-Ken, 4858561
Japan

Makiko Ohno

This certificate expiration is updated based on periodic audits. The current expiration date and scope of accreditation are listed at: www.eAuditNet.com - Online QML (Qualified Manufacturer Listing).

In recognition of the successful completion of the PRI evaluation process, accreditation is granted to this facility to perform the following:

AC7114 Rev C - Nadcap NonDestructive Testing (NDT) Suppliers Accreditation Program Audit Criteria

AC7114S Rev D - Supplemental Audit Criteria for Nadcap NonDestructive (NDT) Suppliers Accreditation Program Audit Criteria

S-U10 GE
S-U2 Pratt & Whitney
S-U3 Rolls-Royce PLC

AC7114/1 Rev C - Nadcap Audit Criteria for NonDestructive Testing Facility Penetrant Survey

AC7114/1S Rev D - Supplemental Audit Criteria for Nadcap Audit Criteria for NonDestructive Testing Facility Penetrant Survey

S-U10 GE
S-U2 Pratt & Whitney
S-U3 Rolls-Royce PLC

AC7114/4 Rev C - Nadcap Audit Criteria for NonDestructive Testing Facility Film Radiography Survey

AC7114/4S Rev D - Supplemental Audit Criteria for Nadcap Audit Criteria for NonDestructive Testing Facility Film Radiography Survey

S-U2 Pratt & Whitney
S-U3 Rolls-Royce PLC

Americas
+ 1 724 772 1616

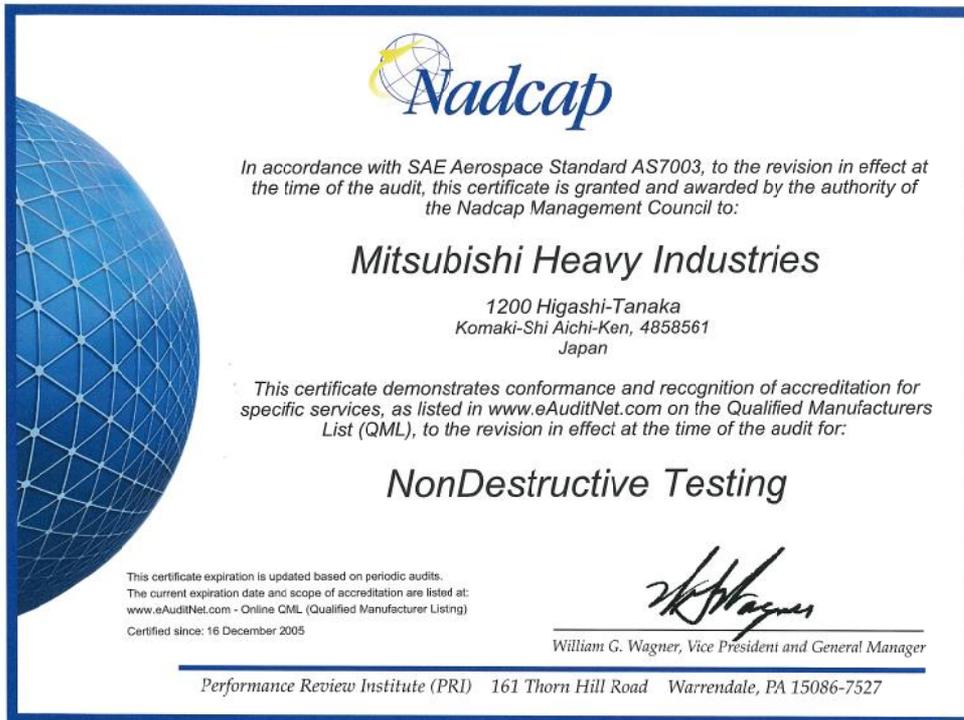
Asia

www.pri-network.com

Europe
+44 870 350 5011

060470

• Nadcap認定証 (サンプル)



• 工程凍結

製造では、確認試験等にて量産開始時に設定した**工程**(設備、加工条件、試験方法等)を凍結し、**継続して同じ工程で製造することが要求される。**

• 製造ドキュメントの完備

工程・加工条件等は製造ドキュメントに明確に示し、継続して作業ができるようにする必要がある。

• 工程の変更管理

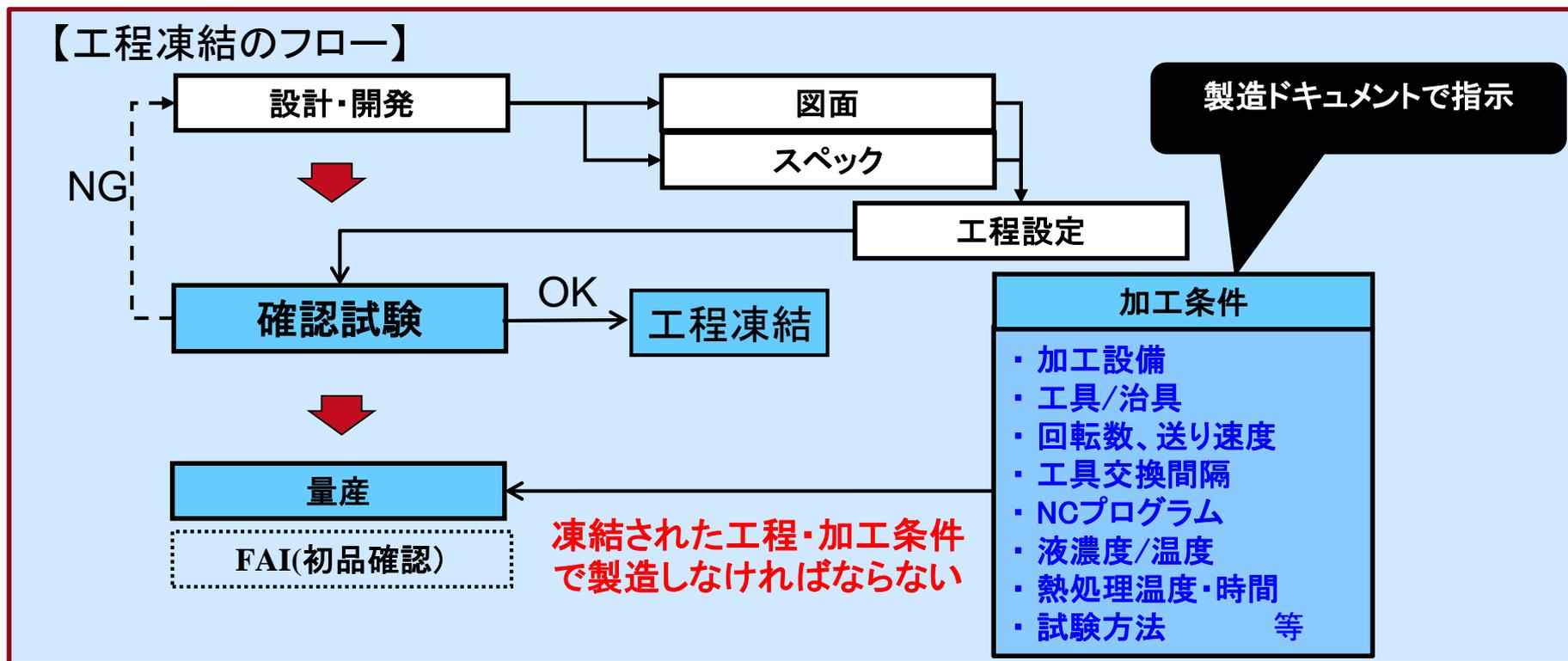
工程変更の際には、確認試験等で**変更が適正であることを証明したうえで変更を適用する**必要あり。

• 製造履歴(トレーサビリティ)管理

30年以上に渡り運用される航空エンジンでは、**長期間の継続生産と変更管理が必須**。重要部品では**40年間の品質記録の保管**が要求される。

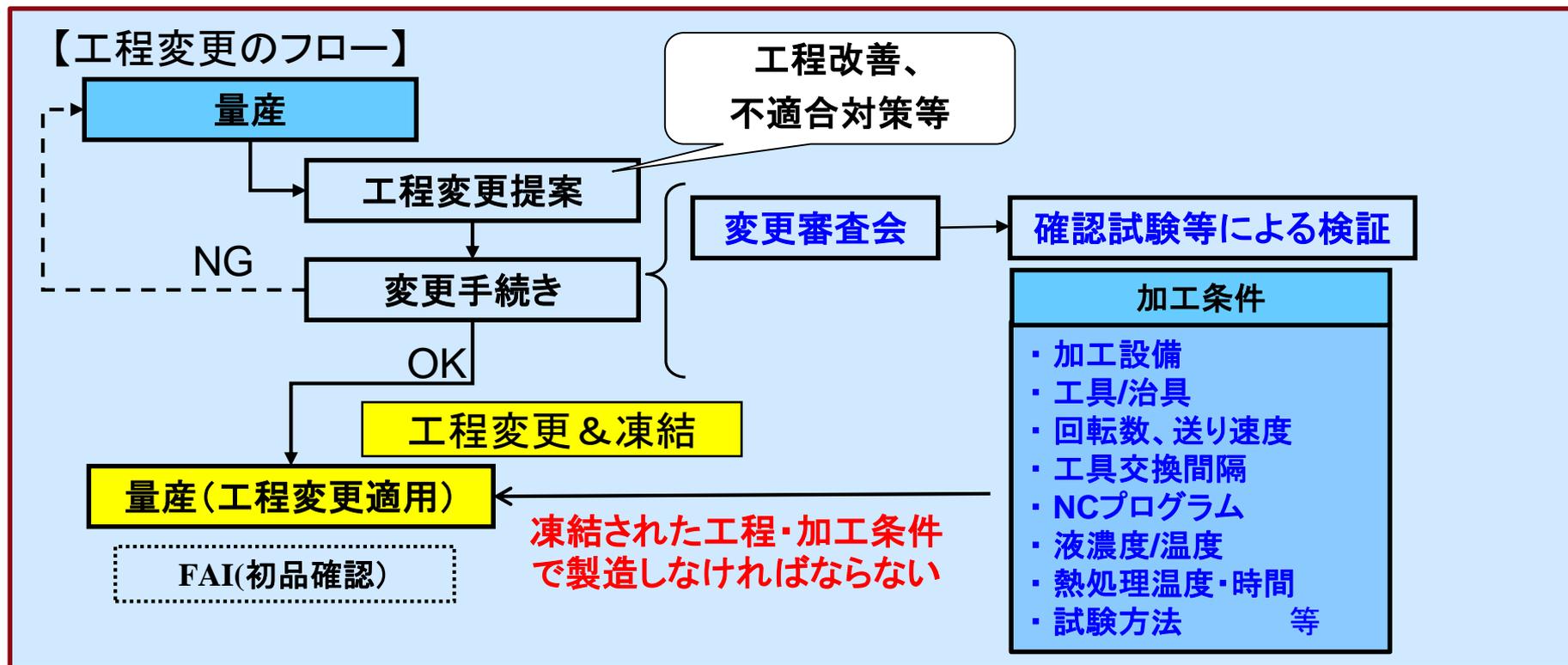
製造工程の凍結と変更管理 (1/2)

- ・部品製造では、確認試験等にて量産開始時に設定した**工程**(設備、加工条件、試験方法等)を**凍結**し、**継続して同じ工程で製造**することが要求される。
- ・工程・加工条件等は製造ドキュメントに明確に示し、継続して作業ができるようにする必要がある。



製造工程の凍結と変更管理(2/2)

- ・工程変更の際には、確認試験等で変更が適正であることを証明したうえで顧客の了解取得後に変更を適用する必要あり。
- ・30年以上に渡り運用される航空エンジンでは、長期間の継続生産と変更管理が必須。重要部品では40年間の品質記録の保管が要求される。



初品検査記録 (FAIR)

- ・量産初品、変更適用後の初品対し、検査記録を残し、顧客の承認が必要。
- ・原則として図面、スペック等の要求の全項目について検査を行い記録を提出する。(燃焼器の場合:約900項目、提出書類の厚さ 約30cm必要)

Form-1: 部品の構成

AS9102 Rev A First Article Inspection
Form 1: Part Number Accountability

1. Part Number	2. Part Name	3. Serial Number	4. FAI Report Number
5. Part Revision Level	6. Drawing Number	7. Drawing revision level	8. Additional Changes
9. Manufacturing Process Reference	10. Organization Name	11. Supplier Code	12. P.O. Number
13. Detail FAI <input type="checkbox"/>	14. Full FAI <input type="checkbox"/>	Baseline Part Number including revision level	
Assembly FAI <input type="checkbox"/>			

a) if above part number is a detail part only, go to Field 13
b) if above part number is an assembly, go to the "INDEX" section below.

INDEX of part numbers or sub-assembly numbers required to make the assembly noted above.

21. Reviewed By _____ 22. Date _____
23. Customer Approval _____ 24. Date _____

Form-2: 素材、特殊工程、機能試験結果

Sheet 1 of _
Special Process(es), Functional

1. FAI Report Number	2. FAI Report Number
3. Customer Approval/Verification (Yes/No/NA)	4. Certificate of Conformance number

Special Fields
By Organization or Customer

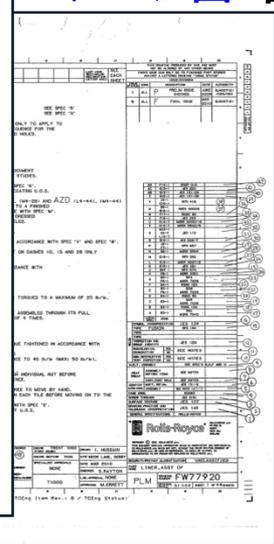
or disposition.

Form-3: 寸法、重量等の検査結果

Sheet 1 of _

1. FAI Report Number
Special Fields By Organization or Customer
or disposition.

バルーン図: 各特性に吹き出しを付けた図面



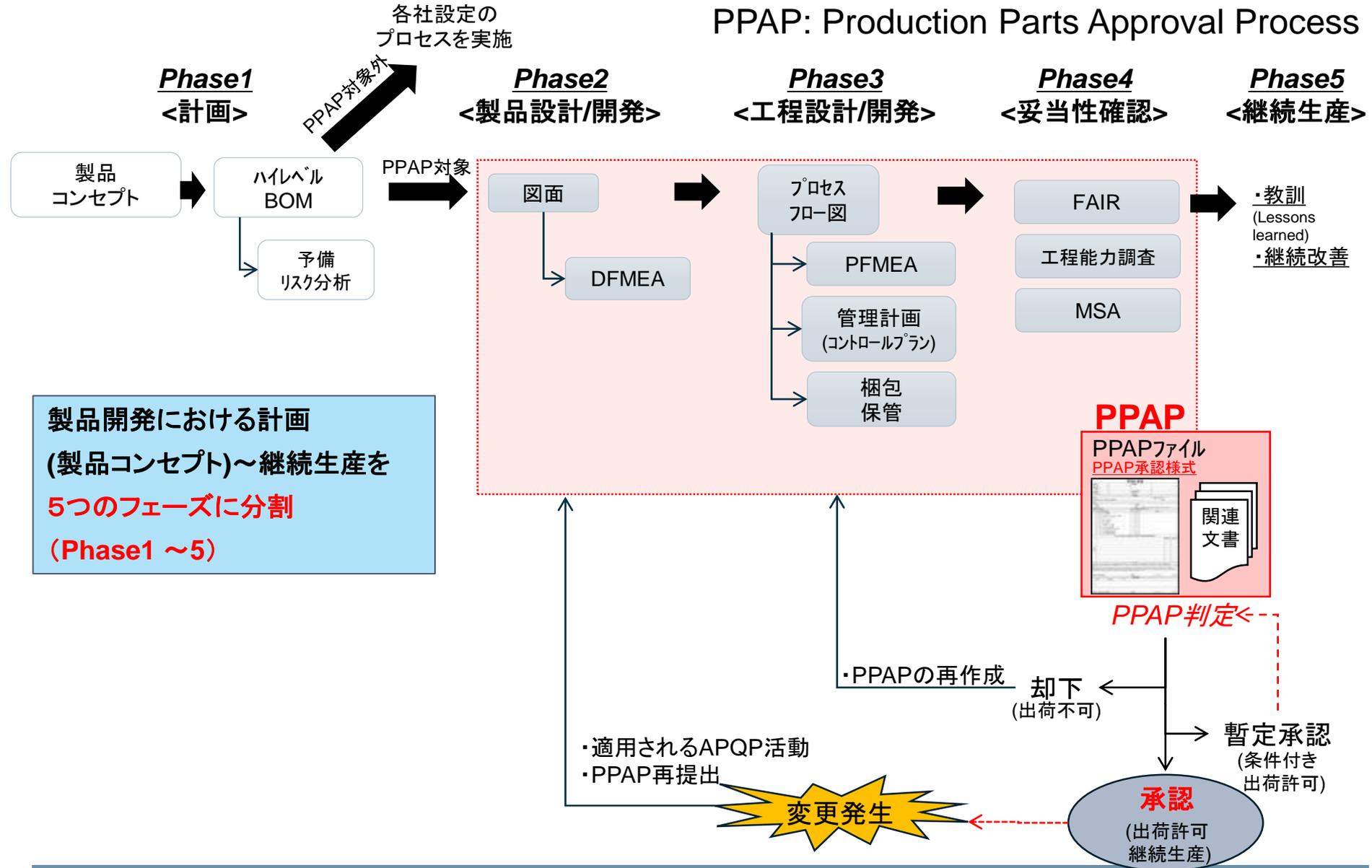
これらに加えて

- ・工程記録
- ・部品、材料成績書
- ・特殊工程の認定記録
- ・切断評価等の記録
- ・不適合の記録

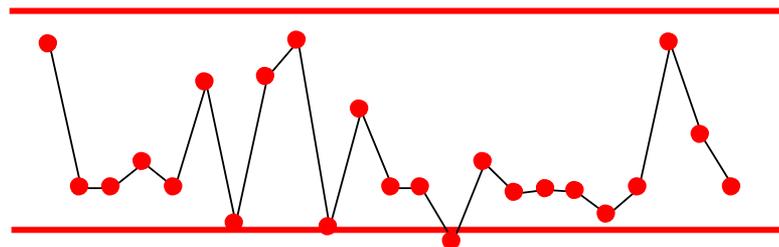
などが必要となります。

FAIR: First Article Inspection Report

PPAP: Production Parts Approval Process

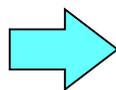


計測システムの評価(ゲージR&R)



製品の寸法を計測した場合

製品のばらつき？
測定 のばらつき？



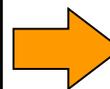
測定が適正であることを確認しないと
正しい評価ができない

- ・安定した製品製造には**工程、製品をモニターする計測システム**が必須。
- ・計測器は通常、定期校正で精度等は確認されますが、さらに
 - ・何回測定しても同じ結果になるか？ (繰り返し性: Repeatability)
 - ・誰が測定しても同じ結果になるか？ (再現性: Reproducibility)が重要で、この評価方法として「**ゲージR&R**」が要求される。
- ・通常**3人 × 3回 × 10部品**で計測を行い統計ソフトにて評価する。

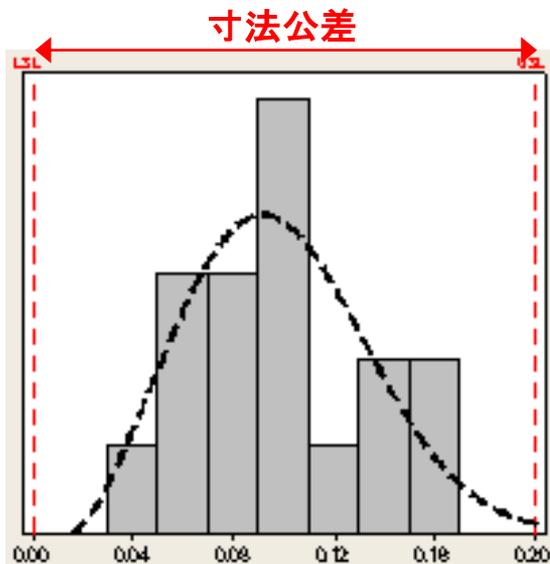
工程能力評価(Cpk)と改善

- ・不適合が発生すると大きな損失だけでなく最悪の場合人命に影響する。
- ・このため十分な工程能力が必要であり、**重要な部品には工程能力の評価と改善が要求される。**(寸法公差を満足するだけでは不十分)

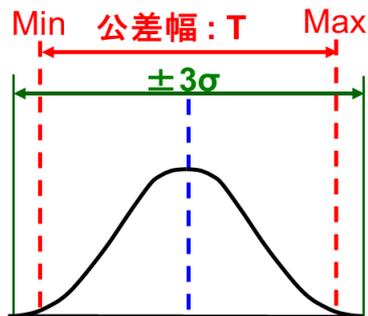
- ・ その工程でつくられる製品のバラつきの大きさ
- ・ 規格内の製品を継続して生産できる能力



工程能力指数Cp,Cpkで評価



Cp: 公差幅に対するバラつきの大きさ



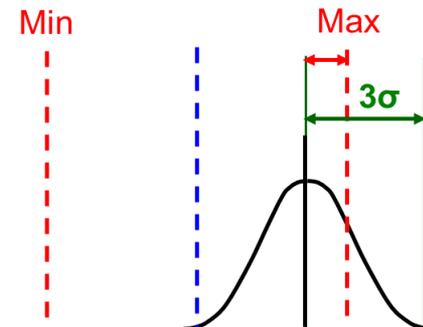
正規分布図

$$Cp = \frac{T}{6\sigma}$$

公差幅

σ:ばらつき

Cpk: 平均値からのズレを考慮



正規分布図

$$Cpk = \frac{(Max - Ave)}{3\sigma}$$

- ① 品質の良い製品を継続的にお客様に提供するための良い「プロセス」（手順、仕事のやり方、ルール）を作って、
- ② その「プロセス」とおり作業し、
- ③ そのプロセスを適切に維持・改善していく

こと

「プロセス」（手順、仕事のやり方、ルール）に従って、作業を実施し、**確実に記録に残す**ことが重要