平成２８年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「環境対応型航空機降着装置用亜鉛・ニッケル合金めっきの実用化技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 年３月

担当局　中部経済産業局
補助事業者　浅下鍍金株式会社

目　次

第１章 研究開発の概要　２

１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標　２

1-1-1　研究背景　３

1-1-2　研究目的及び目標　４

１－２　研究体制　５

１－３　成果概要　５

１－４　当該研究開発の連絡窓口　６

第２章　本論　７

【1　航空機降着装置部品への低水素脆性型 Zn･Ni 合金めっき適用プロセスの確立】　７

【2　低水素脆性 Zn･Ni 合金めっき設備の最適化への対応】　１２

【3　低水素脆性型 Zn･Ni 合金めっき膜厚測定方法の確立】　１５

【4　低水素脆性 Zn･Ni 合金めっき剥離手法の開発】　１７

【5 低水素脆性型 Zn･Ni 合金めっきの生産性・事業性評価】　18

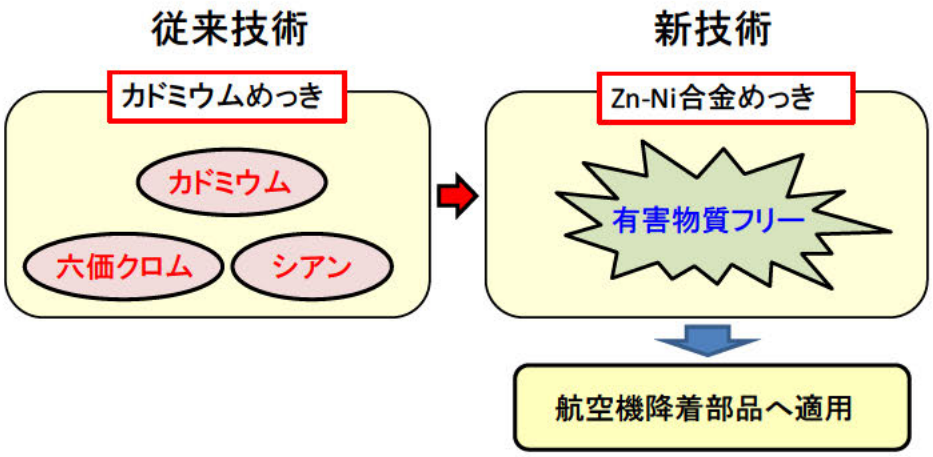
第３章　全体総括　１９

第１章　研究開発の概要

１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標

近年欧州の RoHS 規制や REACH 規制を初めとする有害物質規制により、カドミウム、シアン及び六価クロムの使用が禁止されているが、航空機降着装置に使用される超高抗張力鋼の耐食めっきとして、低水素脆性型カドミウムめっきあるいはチタニウム・カドミウム(Ti-Cd)合金めっきを使用している。これらのめっき液には環境有害物質であるカドミウム、シアンが含まれ、後処理として行われるクロメート処理液には、六価クロムが含まれている。

本研究開発では、研究実施機関の浅下鍍金㈱、石川県工業試験場、学校法人鶴学園広島工業大学、㈱高林製作所とアドバイザーの深田熱処理工業㈱及び国内唯一・世界５番目のシェアを持つ降着装置メーカである住友精密工業㈱等と連携して、降着装置にこれまで適用されている耐食めっきと同等以上の耐食性を持ち、めっき処理においてカドミウム、シアンを、めっき処理後のクロメート処理に六価クロムを使用しない新プロセスを開発することで環境対応型の代替カドミウムめっき技術として低水素脆性型亜鉛・ニッケル合金めっきの成膜技術を確立する。



【高度化指針において定める川下製造業者等の抱える課題及び要請（ニーズ）】

（六）表面処理に係る技術に関する事項

１　表面処理に係る技術において達成すべき高度化目標

３）航空宇宙分野に関する事項

川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

イ．耐久性、耐環境性能の向上

カドミウム及び後処理のクロメート処理時の六価クロムを完全排除した安全な作業環境を構築するとともに、従来耐食めっきと同等以上の耐久性・耐環境性のある代替カドミウムめっきの実用化を図る。

ウ．メンテナンス性

実用化に際し、製造時・メンテナンス時に必要となるタッチアップによるめっき手法、ならびに、降着装置は運用開始後８年から 10 年でオーバーホールされるが、その時に必要となるめっきの剥離方法について開発する。併せて、めっきの品質を保証するために、めっき後の膜厚測定手法を開発する。

1-1-1　研究背景

航空機降着装置は、離着陸時に使用される重要な保安部品に指定され、機体重量を直接支えている。着陸時には、機体重量＋着陸の衝撃も負荷されることから、抗張力が1930MPa を超える Ni-Cr-Mo 系の低炭素鋼（300M 鋼）が使用される。通常、降着装置材料には防食目的で表面処理が施されるが、生産性やコストの観点よりめっきが採用されている。しかし、めっき処理時に発生する水素ガスによる水素脆性が懸念される。鉄鋼材料の水素脆性感受性は、強度上昇とともに敏感になり、特に抗張力が 1200MPa 以上の鉄鋼材料では、材料中の僅かな水素によって水素脆性が発生するとともに、応力腐食割れに対しても敏感な材料となる。

自動車産業では、環境規制に対応するため、耐食性に優れた Zn·Ni 合金めっきが開発され、六価クロムに替わって三価クロムによるクロメート処理が開発され六価クロムフリーが実用化されているが、自動車産業に適用される鉄鋼材料の大多数は比較的強度の低い炭素鋼のため Zn·Ni 合金めっきに対する水素脆性は問題視されていない。

水素脆性対策の観点から、従来航空機降着装置の主要材料である 300M 鋼に対して、水素脆性感受性が低いカドミウムめっきあるいはチタニウム・カドミウム合金めっきが施されている。航空機降着装置の破損については、航空機の安全運航に大きな影響を与えることから、厳格なプロセス管理の下で施工することが要求されている。厳格なプロセス管理を担保する手段として NADCAP 認証や、発注者(降着装置メーカー)の工程認証等を受けた上で定期的な監査を受けながらめっきプロセスの維持管理を行っている。

前述の社会的ニーズである RoHS 規制や REACH 規制を初めとする有害物質規制により、カドミウム、シアン及び六価クロムの使用が禁止されており、航空宇宙産業でも環境有害物質であるカドミウム、六価クロム、水銀、鉛を全廃する目標をかかげ、欧州はエアバス社、米国は米空軍ならびにボーイング社が中心となって航空機降着装置の超高抗張力鋼に適用される低水素脆性カドミウムめっきに代わる代替カドミウムめっきの実用化研究を進めている。国内においても H18 年～H22 年にかけて住友精密工業㈱を含む航空機装備品メーカが中心となって航空機降着装置の超高抗張力鋼に適用される低水素脆性カドミウムめっきに代わる Zn·Ni 合金めっきの実用化研究が実施されたが、当時のめっき技術では、Zn·Ni 合金めっきによる再水素脆化の問題、ならびに、めっきに起因した疲労強度低下の問題が解決できなかったことから、現在まで実用化に至っていない。本研究開発では、降着装置メーカである住友精密工業㈱等と連携して従来耐食めっき技術に代わって環境有害物質を含まない新しいめっき手法を研究開発し、超高抗張力鋼 300M に適用し事業化に繋げることが主目的である。

本研究開発を推進する浅下鍍金㈱は、硬質クロムめっきと亜鉛めっきにおけるパイオニアであり、半世紀以上に渡り、二輪車、建設機械、繊維機械部品用に様々な表面処理品を供給してきた実績がある。また、住友精密工業㈱、石川県工業試験場及び学校法人鶴学園広島工業大学等の指導のもと航空機用脚部品の中で最も難易度の高い硬質クロムめっきの実用化に成功し、これと並行して、新たに航空機規格でのアルミ陽極酸化処理ならびにステンレス鋼に対する不活性処理の設備・技術導入を行い、㈱高林製作所、深田熱処理工業㈱等とのタイアップにより一貫共同生産の事業化を達成した。本研究開発は、H21 年度より技術習得してきた航空機降着装置用表面処理技術と創業時から携わってきた亜鉛めっきの経験を活用することができる浅下鍍金㈱の強みを生かした研究開発である。

1-1-2　研究目的及び目標

本研究開発では、航空機降着部品の環境有害物質フリーで耐食性のある表面処理を実現するために、低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの実用化を目指すものであり、研究項目毎に以下の技術的目標を掲げている。

【1　航空機降着装置部品への低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき適用プロセスの確立】

【1-1】　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの基本特性を考慮したプロセスの確立

航空機降着装置部品へ低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきを適用する場合の最適プロセスを確立し、従来のカドミウムめっきと同等以上の耐食性を確保し、500 時間の塩水噴霧試験で母材の腐食が発生しないことを目標とする。さらにその品質が、航空機降着装置部品に要求される品質要求を満足することを確認しプロセスの確立を行う。

【1-2】　溶液管理手法の確立

低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの通電量に応じた薬品投入量を標準化し、管理を容易にする。また、溶液濃度を管理する為に必要な設備要件を制定する。

【2　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき設備最適化への対応】

【2-1】 低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき設備の最適設計・試作・評価

航空機降着装置部品への低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきに必要な設備の要件を制定した上で、めっき設備の最適設計・試作・評価を行い、得られためっきの品質が、航空機降着装置部品の品質要求を満足することを確認する。また、一般産業界で使用される酸性 Zn·Ni 合金めっきよりも耐水素脆性に優れることを確認する。

【2-2】 複雑形状部品への最適治具の設計・試作・評価

試作した低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき設備を用いて航空機降着装置部品にめっきを施した場合、製品形状に応じた膜厚の差がカドミウムめっきと同等の 10μm 以内に抑えられるような最適治具の設計・試作・評価を行う。

【2-3】 接点タッチアッププロセスの確立

低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの接点箇所、あるいは、めっき時に同時めっきできなかった部分に対し筆めっきによるタッチアッププロセスを確立し、その品質が要求を満足することを確認する。

【3　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき膜厚測定方法の確立】

【3-1】 航空機降着装置部品の品質保証の為の膜厚測定方法の確立

低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの膜厚測定に関しては、蛍光 X 線による測定方法があるが、航空機降着装置部品の全ての膜厚を同手法で測定することは大型部品等、形状の制約により困難である。ポータブル膜厚計で測定する簡易手法を考案・検証し、断面観察による膜厚測定との差を±10%以内とする。

【4　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき剥離手法の開発】

【4-1】 航空機降着装置部品の Zn·Ni 合金めっき剥離手法の開発

航空機降着装置部品に要求される品質を満足し、カドミウムめっき用の剥離液よりも寿命が 2 倍以上となるめっき剥離液を選定し、めっき剥離プロセスを制定する。

【5　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの生産性・事業性評価】

【5-1】 航空機降着装置部品に対する生産性の評価

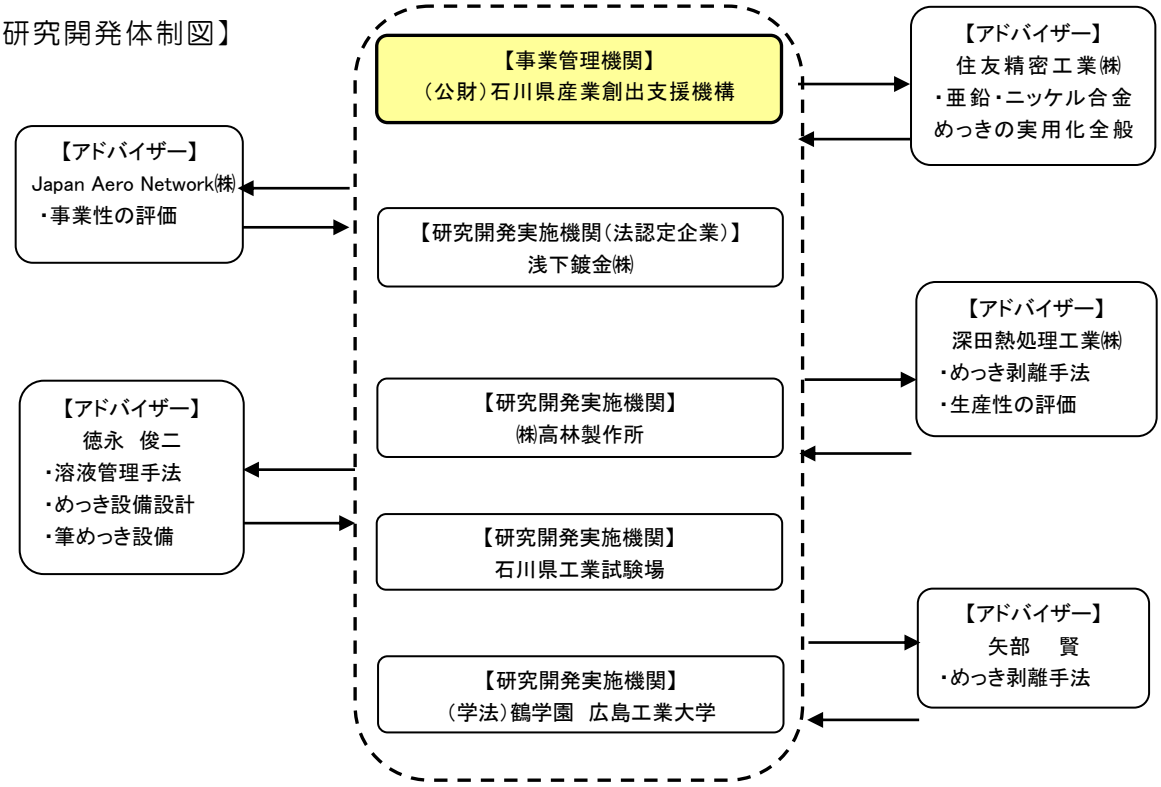
品質、リードタイム、工数、組立性等生産性が従来カドミウムめっきと同等以上である

ことを確認する。
【5-2】 航空機降着装置部品に対する事業性の評価
顧客評価を含め、コスト、生産性の評価を行い、事業として成立することを確認する。

１－２　研究体制

事業管理機関は石川県産業創出支援機構が担当し、浅下鍍金㈱を中心として、㈱高林製作所、石川県工業試験場、広島工業大学が研究実施機関として研究開発を実施した。また、川下ユーザーとして航空機降着部品を手掛ける住友精密工業㈱、航空機業界に詳しいJapan Aero Network㈱、徳永氏、さらには、めっきの専門家として矢部氏、熱処理の専門家である深田熱処理工業㈱をアドバイザーとして、研究サポートをしてもらい、研究開発から事業化までカバーできる体制で実施した。

【研究開発体制図】



１－３　成果概要

本事業では、環境に優しく、耐食性に優れた低水素脆性型亜鉛・ニッケル合金めっきを開発し、航空機降着部品に適用することを目指した。初年度に試作めっきラインを完成させ、実物降着部品ピンへおよび降着装置以外の航空機部品への成膜を実施した。
また、非破壊で大型の降着部品の膜厚を評価する技術を確立し、さらに、めっきの剥離手法を完成させた。
最終的に、航空機機体メーカ（ボーイング社、エアバス社）の要求事項に適応した亜鉛ニッ

ケル合金めっきを成膜できる技術および評価技術を確立し、さらに、メンテナンス事業に参入するための剥離技術を完成させ、実用化の準備を整えた。

以下に、それぞれの項目の成果を示す。

【1　航空機降着装置部品への低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき適用プロセスの確立】

・航空機機体メーカの要求事項である、「塩水噴霧試験500時間で母材の腐食が発生しないこと」を目標値として掲げている。それに対して、本研究にて開発している亜鉛ニッケル合金めっきの塩水噴霧試験を実施したところ、要求事項500時間をクリアした。さらに、塩水噴霧試験を継続し4000時間でも腐食が発生していないことを確認した。

・航空機業界で最も重要視されている水素脆性破壊に対する評価として、3点曲げ試験を用いた新しい水素脆性評価手法を確立（日本金属学会誌に投稿・掲載済）し、開発しためっき膜は水素脆性に対して強いことを明らかにし、従来カドミウムめっきよりも耐食性に優れていることから、大きなアピールポイントが得られた。

【2　低水素脆性 Zn·Ni 合金めっき設備の最適化への対応】

・製品形状に応じて膜厚の差が従来カドミウムめっきと同等の10μm以内に抑えられるような最適治具の設計・試作・評価を実施するという目標に対して、治具の設計および試作まで行った結果、膜厚差10μm以内を実現した。

【3　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき膜厚測定方法の確立】

・破壊式（切断して断面から観察）と非破壊式（蛍光X線、電磁式、渦電流式）を比較し、断面観察による膜厚測定との差を±10%以内とするという目標に対して、航空機メーカの要求スペック膜厚範囲で目標値をクリアし、非破壊式のポータブル膜厚計を用いた膜厚評価手法を確立した。

【4　低水素脆性 Zn·Ni 合金めっき剥離手法の開発】

・従来カドミウムめっき用剥離液よりも寿命が2倍以上となる剥離液を開発する目標に対して、開発した剥離液は、素地を傷めずに剥離でき、さらに寿命は従来カドミウムめっきの2倍以上であり、目標をクリアした。これにより、剥離が必須となる航空機機体のメンテナンス事業への参入準備が整った。

【5 低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの生産性・事業性評価】

・品質、リードタイム、工数、組立性等生産性が従来カドミウムめっきと同等以上であるという目標に対して、亜鉛ニッケルめっきの組立性評価としてブッシュの圧入試件を実施し、圧入試験による膜厚限界値のデータ等を取得し、組立性、生産性への指針を得ることができた。

・事業化として、ファンボローエアショー等への展示会に出展し、情報収集および販路拡大に努めた。また、各エアラインへの情報提供を行った結果、国内の航空機部品製造メーカから航空機用ベアリングの試作依頼がきており、事業化が期待できる。

1－4　当該研究開発の連絡窓口

所属・氏名：浅下鍍金㈱　浅下　秀昭

E-mail：asashitamekki@nifty.com

電話番号：076-276-3115

第2章　本論

【1　航空機降着装置部品への低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき適用プロセスの確立】

【1-1】　低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの基本特性を考慮したプロセスの確立

本研究開発は、低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの実用化を図ることを目的としており、本項では、まず、Zn·Ni 合金めっき溶液の選定を行い、そのめっき液を使用可能なめっき装置の導入に関する基礎データを取得した。

Zn·Ni 合金めっき液に関しては、酸性とアルカリ性の 2 種類が存在しているが、水素脆性に対して強いアルカリ浴を選択した。

さらに、アルカリ浴の Zn·Ni 合金めっき液を作製しており、航空機メーカに採用実績のある薬品メーカとして、2 社のめっき液を選択して評価を行った。

また、水素脆性に関しての評価手法に関しても検討した。詳細な内容を、以下に示す。

・めっき液選択の実験方法

石川県工業試験場所有の小型めっき実験装置（㈱山本鍍金試験機製 10L めっき試験装置、図 1 参照）を用いて、2 種類のめっき液の基本特性を評価した。

基板にはハルセル陰極板(㈱山本鍍金試験器製、100×67×0.3mm)を用いた。

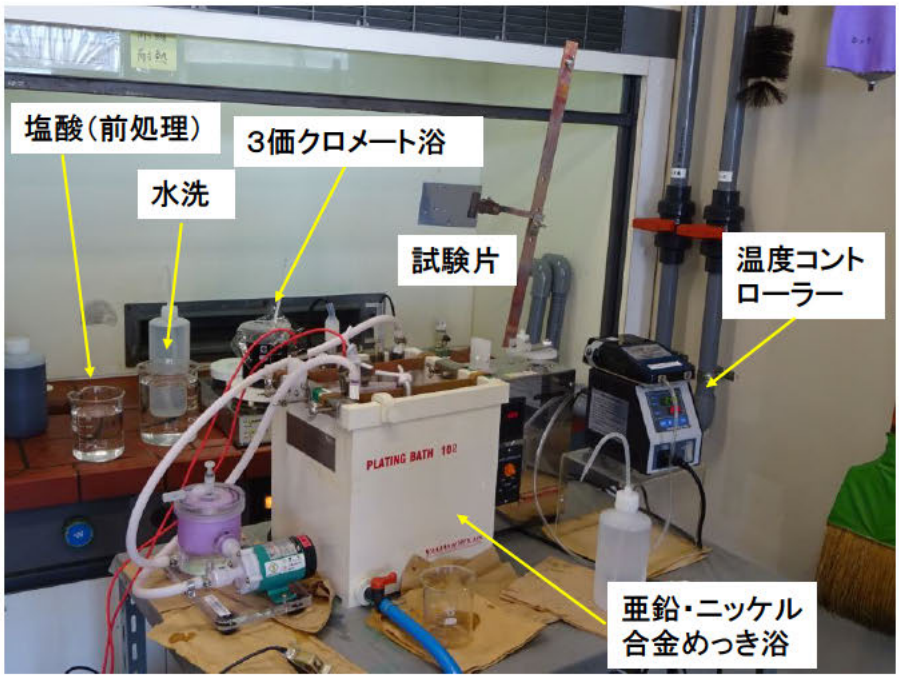


図 1　Zn-Ni 合金めっき液選択用小型めっき設備

試料は、ハルセル陰極板を有機溶剤脱脂、水洗、酸活性後、めっきを行った。めっきは 10L 水槽を用い、カソードロッカーおよび液循環(濾過)による攪拌を行った。なお、炭酸ナトリウム

が生成されるため、エア攪拌は行わなかった。

めっきの試作工程を図２に示す。めっき後、水洗を行い、クロメート処理を行った。クロメート、水洗後、エアおよび乾燥機により乾燥を行った。

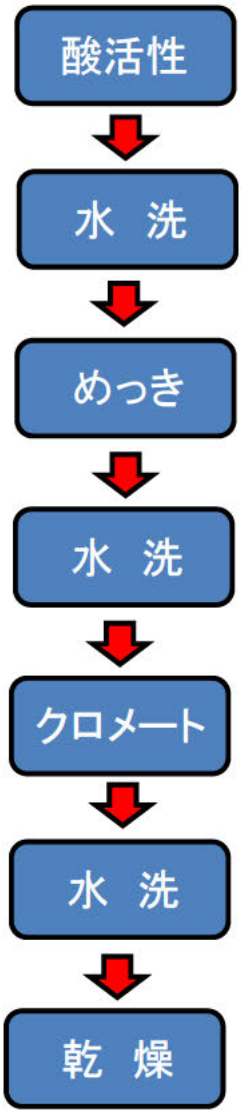


図２　めっき試作工程

試作した試料を図３に示す。作製した試料は、ほぼ均一に青みがかった色調であることがわかった。

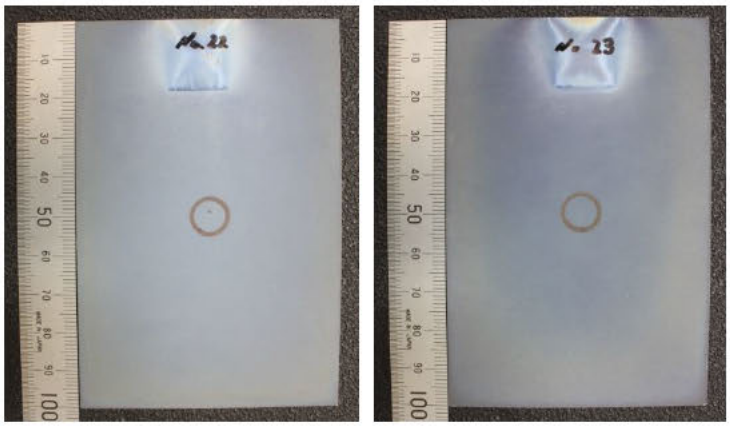


図３　試作試料の外観

図４に各試料の塩水噴霧 500 時間後の結果を示す。

塩水噴霧試験は ASTM B571 に従って試験を行った。ボーイングの資格要求では、めっきの耐食性として、500 時間で赤サビが発生しないことが、指針で示されているため、500 時間の塩水噴霧試験を行った。その結果、500 時間段階で白サビは生じたものの赤サビは発生しなかった。

図４　塩水噴霧 500 時間後の結果

・水素脆性の評価手法の検討

本研究開発で対象となっている航空機用降着部品には引張強度が 2000MPa を超えるニッケル-クロム-モリブデン鋼が適用されている。一般に鉄鋼材料は強度が増すにつれ、水素脆化割れの感受性が増し、特に 2000MPa を超える航空機用脚材では、水素脆性に対して注意が必要であり、そのため表面処理に対して従来の鉄鋼材料に要求される防食性のみならず、耐水素脆性を考慮したプロセスが要求されている。

これまで防食性と耐水素脆性の両者に優れたカドミウムおよびチタンーカドミめっきが適用されてきた。しかし、カドミウムの毒性より、その使用が厳しく制限され、ボーイング社では、2016 年までにカドミウムの使用を全廃するという目標を掲げており、そのためカドミウムおよびチタンーカドミめっきの代替めっきプロセスの開発が緊急の課題になっている。

評価としては、水素脆化挙動を簡便かつ定量的に測定する方法として、低歪速度 3 点曲げ試験（SSRT：Slow Strain Rate Test）を用いて水素脆化感受性を求めることを検討した。

本試験は、図５に示す３点曲げ試験機を用い、試験片サイズを４×70×t0.5mm の薄片とし、ひずみ速度 0.01mm/sec の低速度で試験を行った。

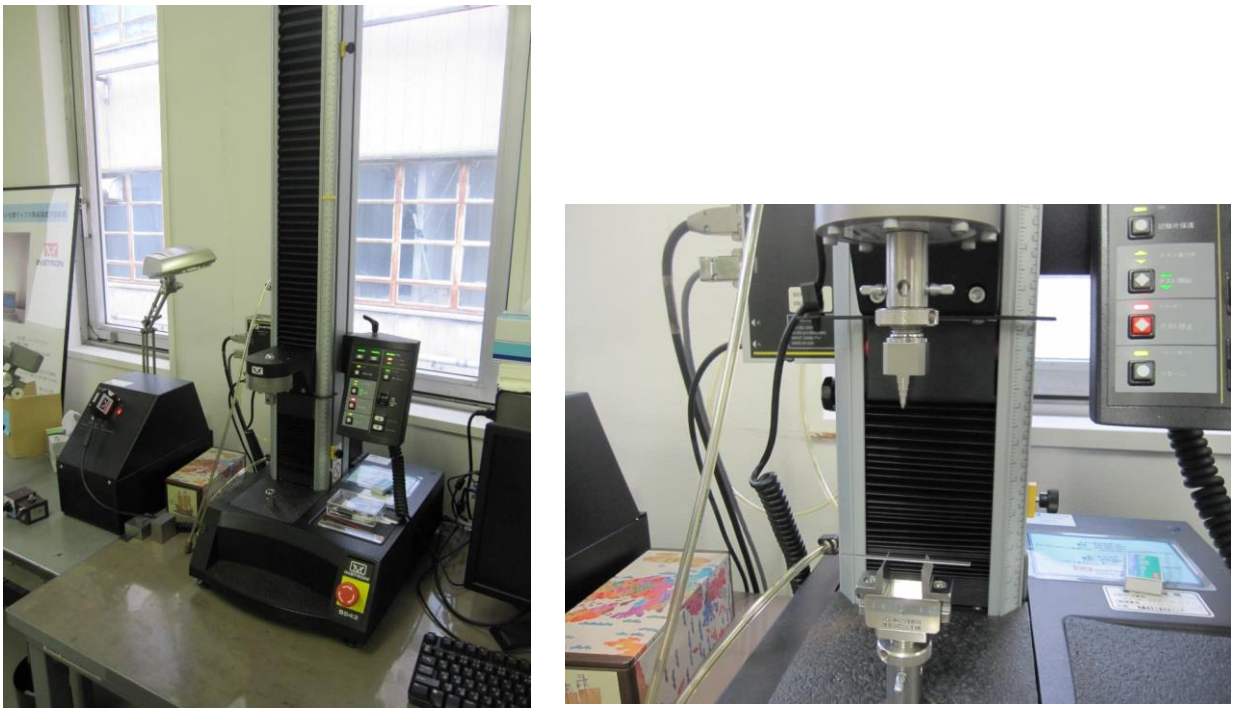


図５　水素脆化感受性を評価する３点曲げ試験機

本事業で開発したアルカリジンケート Zn-Ni 合金めっきおよび同じアルカリジンケート亜鉛めっきの 3 点曲げ試験結果を図 6 に示す。なお、めっき後、クロメート処理が施されている。亜鉛めっきでは、めっき前の未処理の試験片と比較し、破断応力および変位量ともに大幅に低下し、水素脆性感受性が増大する。この亜鉛めっきに対してベーキング処理を行うことで、破断応力および変位量は向上し、水素脆性は改善されるが、その効果は僅かであった。

Zn-Ni 合金めっきの破断応力および変位量は亜鉛めっきのそれらよりも低い値を示し、水素脆性感受性が高まった。この結果は、これまで検討した硫酸酸性浴からの Zn-Ni 合金めっきとは異なっており、後処理として施したクロメート処理が影響していることが考えられる。一方、Zn-Ni 合金めっきにベーキング処理を施すことによって破断応力および変位量は大幅に向上し、めっき前の未処理の試験片とほぼ同じ値に回復した。このことから本事業で開発したアルカリジンケート Zn-Ni 合金めっきはベーキング処理を行うことで耐水素脆性に対して問題無いことが実証された。

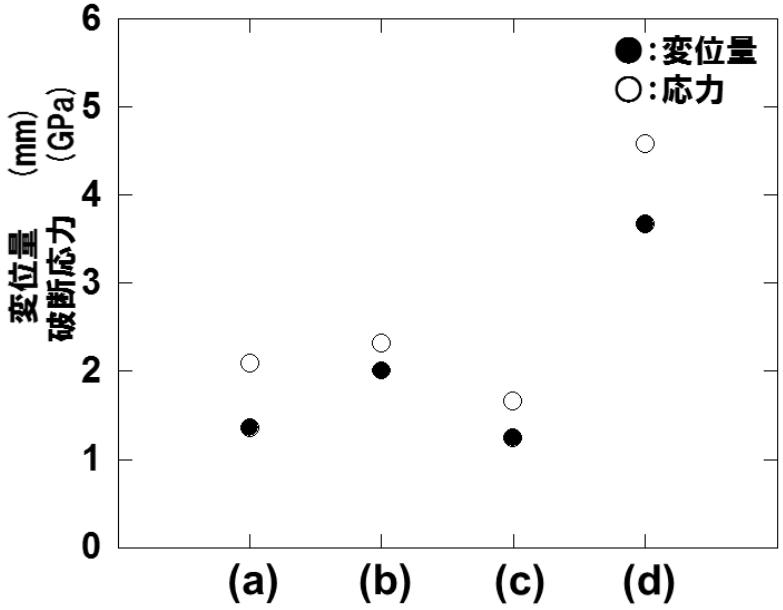


図６　３点曲げ試験によるアルカリジンケート亜鉛および Zn-Ni 合金めっきの
破断応力および変位量
⑷ 亜鉛めっき　⑹　亜鉛めっき＋ベーキング
⑹ Zn-Ni 合金めっき　⑹ Zn-Ni 合金めっき＋ベーキング

【1-2】　溶液管理手法の確立

前項にて選択しためっき液の溶液管理について、前項で使用した 10L 小型めっき槽にて検討を行った。

試験は、ハルセル板を用いて繰り返しめっき成膜実験を行い、めっき液の変色から判断を行った。15 回使用した後のめっき液を図 7 に、同めっき液を分析した結果を表 1 に示す。建浴直後（新品）は青紫色のめっき液であるが、めっきを 15 試料作製した後には全体的に色調が薄くなり、茶系統の混じった色調となる。分析結果からも、Zn、Ni 量とも管理値を下回っており、適宜分析および補給を行う必要がある。本事業ではシアンを使用しないことが重要なファクターのひとつであるため、シアンを使用せずにめっき液の分析を行う必要がある。

図 7　めっき液の色調変化

（左：建浴直後（新品）、右：15 回使用後）

表 1　めっき液の分析結果

	分析結果(g/L)	管理値(g/L)
Zn	5.7	7.0-9.0
Ni	0.9	1.1-1.3

溶液管理手法として、下記 3 点に関して調査及び管理手法の検討・確立を実施した。

1．めっき液管理方法の調査
　めっき液メーカ及びボーイング社の液管理方法に関する調査を実施した。

2．めっき溶液の建浴条件の確立
　１項の結果に基づき、製造・修理ビジネスに適用できる建浴条件を確立した。

3．めっき溶液の管理条件・方法の確立
　１項の結果に基づき、製造・修理ビジネスに適用できる管理条件・方法を確立した。

【2　低水素脆性 Zn·Ni 合金めっき設備の最適化への対応】
【2-1】　低水素脆性型Zn·Ni合金めっき設備の最適設計・試作・評価

本研究で行う低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっき設備の設計および設置を行った。

前項【1-1】において小型めっき設備での基礎実験の結果以下のような設備の必要性があることがわかったため、対応できる試作めっきラインを作製した。

- Zn-Ni めっき溶液、クロメート溶液に十分耐えうる材質のタンクの作成
- 密着性向上のためストライクニッケルめっきの工程追加
- Zn-Ni めっきの炭酸塩除去の必要性
- Zn-Ni めっきの攪拌方法の検討（炭酸塩を増やさない方法）
- 大型の試作対象製品をめっき可能とするサイズのタンク検討
- 各処理槽の加温・冷却方法の検討
- Zn-Ni めっきの揺動方法の検討

図8に導入した試作めっきラインを、図9には試作実験を行った様子、図10には試作サンプルを示す。

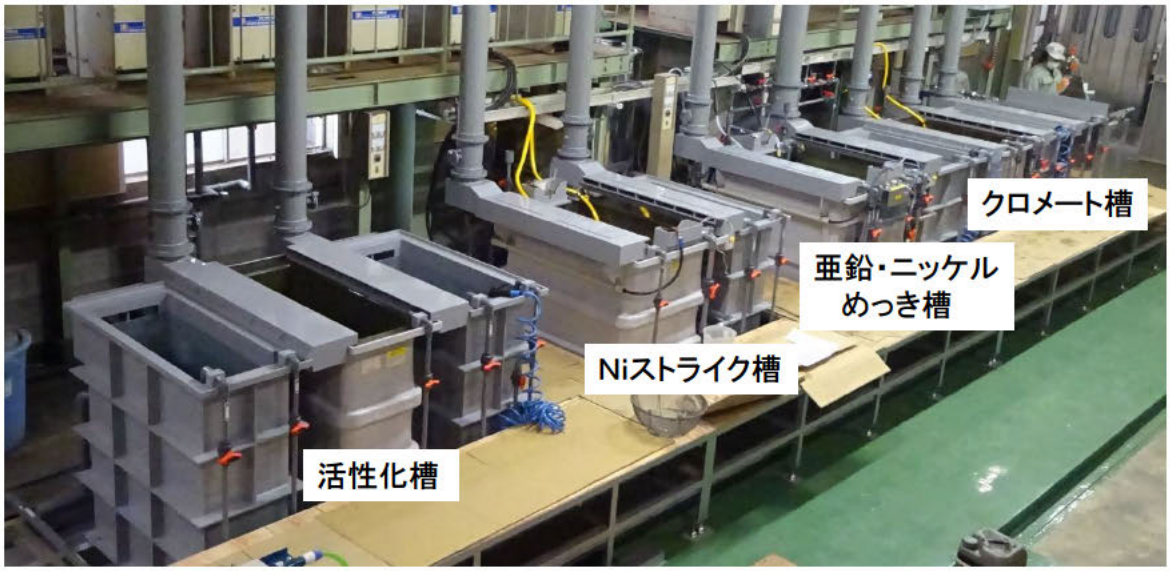


図８　浅下鍍金に導入した低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきライン

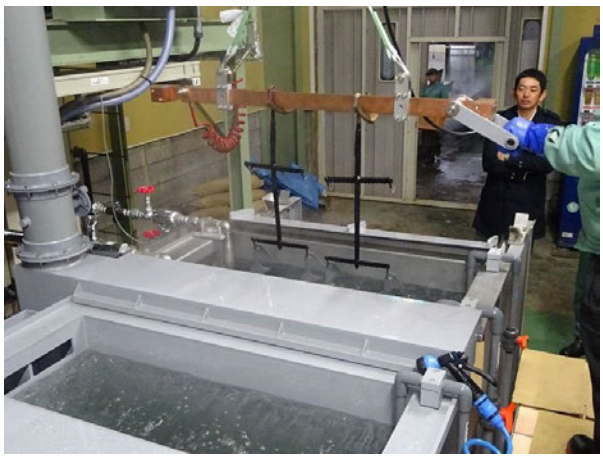


図９　導入しためっき槽による成膜実験

図 10　試作部品

【2-1】　低水素脆性型 Zn･Ni 合金めっき設備の最適設計・試作・評価

導入した試作めっき設備の仕様および付帯設備を確定した。また、試作設備を用いて図 11 に示す実際の航空機部品のピンへの成膜実験を実施した。

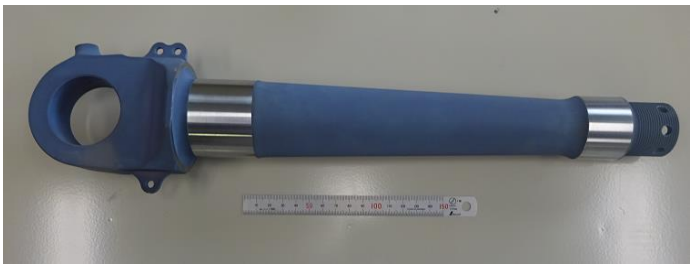


図 11　航空機部品（ピン）への試作

【2-2】　複雑形状部品への最適治具の設計・試作・評価

導入した試作めっき設備を用いて実際の航空機品のピン等への成膜実験を実施した。めっきする部品は形状が複雑であり、部品ごとに最適な治具の設計が必要である。特に内面への成膜治具は重要である。そこで、本研究開発のランディングギア用ピンに適した治具の設計・試作を行った。

その一例として、図 11 に示すピンを試作しためっき治具を図 12 に示す。

図 12　ピンのめっき治具の試作

【2-3】　接点タッチアッププロセスの確立

めっき槽では成膜できない細かい部分を成膜するために、図 13 に示す筆めっきによるタッチアッププロセスを導入した。

その結果、接点箇所、めっき時に同時めっきできなかった部分への対応が可能となった。

図 13　導入した筆めっき設備

本タッチアッププロセスにて、めっき槽では均一に成膜が難しい微小で複雑部分への成膜手法を確立させた（図 14）。

図 14　中心くぼみ部へのタッチアッププロセスによる成膜した試験片

【3　低水素脆性型 Zn･Ni 合金めっき膜厚測定方法の確立】
【3-1】　航空機降着装置部品の品質保証の為の膜厚測定方法の確立

本研究項目では、航空機メーカの膜厚に関する要求仕様を満たしているかを評価する手法を検討した。今回の対象部品は、航空機降着装置部品と大型であり、通常の膜厚評価装置（蛍光X線膜厚計）では測定できない。また、切断して断面から観察する手法は、破壊式であるため対象外となる。そこで、非破壊で大型部品にも適用可能な、プローブを押し当てて測定するポータブル型膜厚計を用いた膜厚管理技術を検討した。

本研究での膜種は、亜鉛とニッケルの合金めっきであるため、簡単には測定ができない、そこで、電磁式、渦電流式といった方式および検量線を引いての評価等を検討した。

試料の膜厚測定は、蛍光 X 線膜厚計（図 15)、ポータブル膜厚計(図 16)にて行った。なお、いずれの膜厚計もめっきの基板であるハルセル陰極板を校正の素地として使用した。

また試料を樹脂埋め研磨後、顕微鏡にて断面膜厚測定を行い、膜厚の絶対値を確認した。

作製しためっきの組成分析は、XDL-B-XYmZ よりもエネルギー分解能に優れる蛍光 X 線分析機(XGT-5000WR：半導体検出器、㈱堀場製作所製、図 15)を用いた。

成膜しためっき試料の膜厚を、蛍光X線膜厚計とポータブル膜厚計で測定した結果を図 17 に示す。ポータブル膜厚計では、いずれの共析率においても蛍光 X 線より 3μm 程度薄く測定された。このためポータブル膜厚計で測定した結果に 3μm 程度加算することで、製品の膜厚を測定できることが分かった。

図 15　蛍光Ｘ線膜厚計

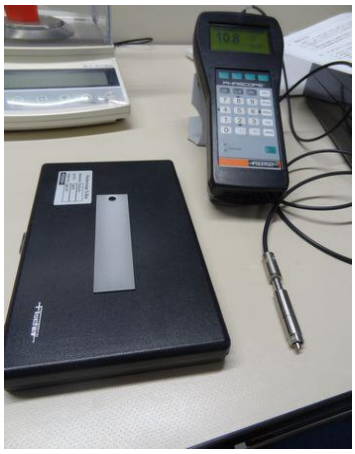


図 16　携帯型膜厚計

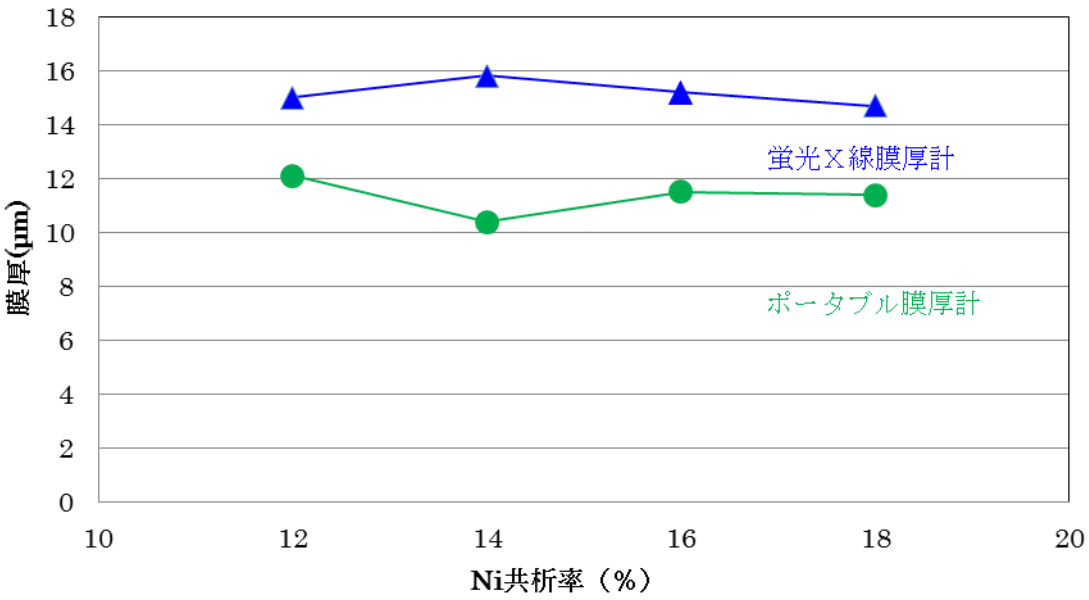


図 17　ポータブル膜厚計による膜厚測定結果

これらの研究成果から、膜厚の測定は蛍光 X 線による手法のみならず、ポータブル膜厚計でも行えることが実証され、大型実製品の生産においてもポータブル膜厚計で膜厚管理を行えることが分かった。

【4　低水素脆性 Zn·Ni 合金めっき剥離手法の開発】
【4-1】 航空機降着装置部品のZn·Ni合金めっき剥離手法の開発

本研究開発の事業化の一つとして「メンテナンス事業」への進出を考えている。メンテナンス事業では、定期的に航空機降着部品を航空機本体から一旦外して、めっきを剥離して、再めっきを施している。そのため、めっきの剥離技術が重要であり、本項目で剥離手法を確立した。

水酸化ナトリウム、硝酸アンモニウムを剥離液の主剤として、添加する薬品を変化させた剥離液の開発実験を行った。また、現状で最も剥離速度の高いと考えられているシアン化ナトリウムと同等以上の剥離速度の達成を目標とした。

・実験方法

作製した試料の、めっき前と剥離前の質量差をめっき質量、めっき後の質量と剥離後の質量差を剥離後の質量、めっき前の質量と剥離後の質量差を剥離による質量減とした。表 9 に剥離試験結果の一例を示す。

もっとも剥離速度が高いと考えられていたシアン化 Na を用いる手法を基準(7 分)として評価した結果、剥離液 6 番、9 番がシアン化 Na と同等の剥離速度となっており、12 番の剥離液では、シアン化 Na を上回る、およそ 5 分で剥離が完了した。

表 2　剥離実験結果

	めっき前質量(mg)	めっき後質量(mg)	めっき質量(mg)	処理後の質量(mg)	処理後の増減(mg)	剥離時間（分）
1	19475.2	20266.1	790	19472.4	-2.8	7
2	19520.8	20145.9	625.1	19527.8	7	35
3	19305.2	19904.9	599.7	19318.4	13.2	18
4	19329.2	19957.5	628.3	19734.4	405.2	35
5	19570	20322.5	752.5	20143.7	573.7	35
6	19346.8	200769	730.1	19344.5	-2.3	7
7	19552.8	20193.1	640.8	19610.6	58.3	35
8	19573.1	20316.7	742.9	20138.9	565.1	35
9	19335.4	20160	824.6	19298.7	-36.7	7
10	19490.5	20289.6	799.1	19473	-17.5	20
12	19292.8	20026.1	733.3	19290.4	-2.4	5
13	19300.2	20041.1	740.9	19546.4	246.2	35
14	19456.7	20081.7	625	19456.7	0	20

剥離試験の様子を図 18 に示す。剥離試験の結果、平板試料は 10 分で剥離が完了し、素材へのダメージはみられなかった。

図 18　剥離試験の様子

シアン＋メタニトロベンゼンスルフォン酸による剥離方法を標準として、環境対策および作業の安全性(腐食・取扱)経済性などを考慮して試験を行った。その結果、最終的に 4 種類の剥離液を開発し、繰り返しの剥離に耐えること、また、従来のカドミウムめっきの剥離液に対しても寿命は 2 倍以上向上することを確認した。

【5 低水素脆性型 Zn·Ni 合金めっきの生産性・事業性評価】

【5-1】　航空機降着装置部品に対する生産性の評価

航空機降着装置部品に対する生産性を評価するため、Zn-Ni 合金めっきをブッシュ等に成膜し、圧入試験を実施した。その結果、めっき膜厚により圧入できない試料があることがわかり、今後の生産性および組立性の指針となるデータが得られた。

【5-2】　航空機降着装置部品に対する事業性の評価

航空機製造会社のボーイング社、エアバス社は、降着装置に適用しているカドミウムめっきの代替方法について、ようやく亜鉛-ニッケル合金めっきの採用に積極的に取り組んできている。すでに、ボーイング社は航空機の機体用ファスナー・リベット部品には適用済であり、今後は最も多用化される降着装置部品への適用拡大を目指してしている。

一方のエアバス社は新造機 A 350 XWB 機に対して、カドミウムめっきの適用を止めて水溶性塗装と言われている SermeTel CR 962 を検討中との情報があるものの、最近では亜鉛-ニッケル合金めっきに軸足を向けて取組み始めている状況下にある。

更に、U.S. Air Force は正式に降着装置に対して、亜鉛-ニッケル合金めっきを採用することを決めたこともあり、民間機への適用が加速化される方向にある。

現段階では整備分野での事業化の可能性が高いため、降着装置の整備を実施している JAL, ANA 両社との交流を行い、亜鉛-ニッケル合金めっきの採用の動向を探りながら整備分野の事業化を優先する。特に、整備の段階で 100%交換されるブッシングの亜鉛-ニッケル合金めっきの採用を JAL＆ANA 社と連携して取り組んで具現化する。また、第２段階としてボルト類への適用を働き掛ける。

一方の製造分野はエアバス社の新造機 A 350 XWB 機の動向と欧米降着装置メーカからの情報入手に努めて製造分野にも進出できるように体制を整える。

上記の情報収集および動向調査の成果として、国内の航空機部品メーカから、航空機部品のめっき試作依頼を受け、試作を実施した結果、付き回り性良く成膜できており、今後のさらなる事業化の拡がりが見えてきた。

第３章　全体総括

（１）「複数年の研究開発成果」

本研究開発では、航空機の降着装置部品を、環境負荷の高い「カドミウムめっき」から環境に優しい「亜鉛・ニッケル合金めっき」に置き換えることを目標として研究開発を実施した。

新たに航空機用大型部品が試作できるめっきラインを構築し、様々な航空機部品を試作して評価を行った。評価としては、非破壊で膜厚を測定可能なポータブル膜厚計での測定技術の開発、および、航空機のメンテナンス事業に対応できるようにするために、めっきの剥離液の開発およびその剥離技術を開発し、実用化ができるステージまで開発が進んでいると考えている。

本研究で開発した新しい亜鉛・ニッケル合金めっきと従来 Cd-Ti めっきと比較した結果を図 19 に示す。

全体的に比較した結果、チタンカドミウム(Ti-Cd)めっきに比べ、開発した亜鉛・ニッケル合金めっきは、めっき作業が容易である点、液管理のランニングコストが低い点、有害性が低く、安全性が高い点から優位性が高いため実用化は可能であると考えられる。

	Ti-Cdめっき（従来）		Zn-Ni合金めっき（開発）	
成膜時間	20分 （規定膜厚：13～18μm）	○	25分 （規定膜厚：12～20μm）	○
ベーキング時間(h)	23時間	○	23時間	○
クロメート処理	6価クロム ベーキング処理後実施	×	3価クロム ベーキング処理前実施	◎
メッキ着き回り （凹み部　ラグ部）	悪い （治具、補助陽極必要有り）	×	良い	○
密着性	過酸化水素の影響で悪い （治具、通電方法等の制約有り）	×	非常に良い （メッキ開始の制約無し）	○
経済効果	コスト大 めっき液建替え（年2回必要）	×	コスト小 めっき液の建替え不要	○
有害性	有害、コスト大 液中の成分は猛毒のシアン カドミウムの廃液処理コスト大	×	無害、コスト小 液中の成分に毒物は無し 廃液処理コスト小	◎
安全性	危険性が高い 毒物性薬品の取扱い	×	安全性が高い 毒物や有害金属を有しない	◎

図 19　従来 Cd-Ti と開発した亜鉛・ニッケル合金めっきとの比較図

（2）「研究開発後の課題・事業化展開」

【研究開発成果の効果（波及効果も含む。）】

本研究開発の成果により航空機降着装置向け部品製造に環境対応型低水素脆性型 Zn・Ni 合金めっきの適用ができる。また、航空機運用 8 年～10 年経過後のオーバーホール時には、構造部品の健全性確認のために、めっきは全て剥離され修復時に再めっきが必要となる部品のメンテナンス事業にも環境有害物質を含まない環境対応型低水素脆性型 Zn・Ni 合金めっきの適用ができる。環境対応型低水素脆性型 Zn・Ni 合金めっき処理技術を世界に先駆けて実用化することで、航空機降着装置構造部品以外の高強度部品が適用される航空機構造部品（高揚力装置構造部品等）及び宇宙機器部品への適用も進め、適用分野の拡大が予想される。

【新たな事業展開の可能性】

さらに、本研究開発の成果による環境対応型低水素脆性型 Zn・Ni 合金めっきの実用化技術の確立により、軽量化・高強度及び耐食性が求められている自動二輪車、四輪自動車など自動車関係の油圧シリンダー、空圧シリンダー、電動シリンダーなど足回り部品を対象とした新たな事業展開が見込まれ、市場拡大を進める。

以上