

熱マネジメントに貢献するステンレス鋼板

Stainless Steel Plates That Contribute to Thermal Management

林 篤 剛*
Atsutaka HAYASHI

濱 田 純 一
Jun-ichi HAMADA

田 母 神 剛
Tsuyoshi TAMOGAMI

抄 録

カーボンニュートラル社会に向けて電気自動車 (EV) の普及が進んでいる。バッテリーは使用時や急速充電時の発熱で寿命が低下するため、冷媒や冷却液を用いた熱マネジメントシステムにて冷却が行われる。本研究では、熱マネジメント部品を想定し、0.5~2mmtのステンレス鋼とアルミニウム合金を用いて熱交換性能を評価した。その結果、板厚が薄い場合はステンレス鋼とアルミニウム合金の熱交換性能は僅差であり、冷却水の流れに依存する熱伝達率が支配的であることが分かった。また、耐食性はSWAAT試験を行い、耐圧性は積層型プレート熱交換器の断面形状でシミュレーションした結果、いずれもステンレス鋼が優れる結果であった。ステンレス鋼は上記特性を活かし多様な環境で使用できるため、EVの熱マネジメント部品に貢献可能である。

Abstract

Electric vehicles (EV) are being increasingly used to achieve carbon neutrality; however, EV batteries heat up during use and fast charging, shortening their life. Thus, the batteries need to be cooled using refrigerants or coolants through a thermal management system. In this study, the heat exchange performances through aluminum or stainless steel plates with a thickness of 0.5–2 mm used as thermal management parts were evaluated. The heat exchange performance of stainless steel was almost the same as that of aluminum when the thicknesses of the plate was low, and it depended on the heat transfer because of water flow. Furthermore, stainless steel plates were superior to aluminum plates in terms of corrosion resistance in the SWAAT and pressure resistance in the cross-sectional shape of the stacked-plate heat exchanger. Stainless steel plates that have these superior properties can be used in a variety of environments, and contribute to thermal management components for EVs.

1. 緒 言

カーボンニュートラル社会に向けて自動車の電動化 (EV化) が進められている。EVの課題の一つがバッテリーの長寿命化であり、使用時や特に急速充電時の発熱が寿命を低下させる¹⁾、バッテリー冷却は空冷が多かったが、近年では液冷型熱マネジメント部品の搭載が進んでいる²⁾。熱マネジメント部品には例えばラジエーター、冷却液であるLLC (Long Life Coolant) を冷媒にて冷却する積層型プレート熱交換器、バッテリーモジュールをLLCにて冷却するバッテリー冷却器等がある。これらの部品の素材としては熱伝導率に優れるAl合金が主に用いられる。一方、冷媒の種類や冷却能に応じた部品内部の高圧化^{3,4)}、部品の薄肉化、コンパクト化に対しては素材の高強度化が求められる。

また、外部からの塩害腐食や使用地域によりLLCの希釈水のCl濃度やpH等が異なる場合があるため⁵⁾、素材には耐食性が求められる。Al合金より高強度で耐食性に優れるステンレス鋼は熱伝導率がAl合金の約1/10であることが課題であるが、積層型プレート熱交換器やバッテリー冷却器の熱交換性能を比較した報告は見当たらない。

今回、著者らは積層型プレート熱交換器やバッテリー冷却器の様に伝熱方向が板厚方向である熱交換を想定し、ステンレス鋼とAl合金を用いて熱交換性能に及ぼす素材板厚の影響について評価した。その結果、板厚が薄い場合、ステンレス鋼とAl合金の熱交換性能は僅差となることを明確にした。また、ステンレス鋼とAl合金の耐食性および耐圧性も評価したので、これらの結果を報告する。

* 山口技術研究部 ステンレス薄板研究室 商品研究課長 山口県光市大字島田 3434 〒743-8550

2. 熱交換性能の評価

2.1 熱交換性能の実験方法

供試材は1および2mmのA1100(純Al系合金, 熱伝導率 $\lambda=217\text{W}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)と0.5, 1および2mmのフェライト系ステンレス鋼SUS444(Fe-19Cr-2Mo-0.5Nb, $\lambda=20.7\text{W}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)およびオーステナイト系ステンレス鋼SUS304L(Fe-18Cr-8Ni, $\lambda=14.7\text{W}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)を用いた。熱交換試験の概略図を図1に示す。試料に入熱した熱は試料の板厚方向に熱伝導し, 冷却水に熱伝達し, 冷却水が流れることで熱が外に出され熱交換をする。EVで使用されるリチウムイオン電池の最適温度が15~35°Cであり, 本試験においては入熱側壁温が30~35°C程度となるように入熱量300W, 冷却水温度20°C, 冷却水の流量は2, 4, 6L min⁻¹(流速0.2, 0.4, 0.6 msec⁻¹)とした。装置寸法は伝熱面が135cm²(9.1cm×14.8cm), 冷却水の流路断面は1.7cm²(1.4cm×1.2cm)で伝熱面全体と接するように流路を数回折り返している。入熱後定常状態における各温度測定値から, 試料入熱側壁温(低温ほど熱交換性能高い)と熱伝達率を求めた。

また, 本試験における伝熱計算式を下に示す。実験上生じてしまう入熱量や冷却水の入口温度の僅かなバラツキについてはその影響量を本計算式で補正した。また, 各条件における試料入熱側壁温の予測計算を行った。

$$\text{入熱量} : Q1 = 300 \text{ (W)} \quad (1)$$

$$\text{熱伝導率} : Q2 = \lambda \times (T_{In}^M - T_{Out}^M) \times S / t \quad (2)$$

$$\text{熱伝達率} : Q3 = h \times S \times \Delta Tm \quad (3)$$

$$\Delta Tm = (T_{Out}^W - T_{In}^W) / Ln((T_{Out}^M - T_{In}^W) / (T_{Out}^M - T_{Out}^W)) \quad (4)$$

$$\text{熱交換量} : Q4 = (T_{Out}^W - T_{In}^W) \times \rho \times Cp \times A \times v \quad (4)$$

$$\text{定常状態条件} : Q1 = Q2 = Q3 = Q4 \quad (5)$$

λ : 熱伝導率 ($\text{W}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), T_{In}^M : 入熱側壁温 ($^{\circ}\text{C}$), T_{Out}^M : 冷却側壁温 ($^{\circ}\text{C}$), S : 伝熱面積 (m^2), t : 板厚 (m), h : 熱伝達率 ($\text{W}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), ΔTm : 対数平均温度差 ($^{\circ}\text{C}$), T_{In}^W : 冷却水入口温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_{Out}^W : 冷却水出口温度 ($^{\circ}\text{C}$), ρ : 冷却水の密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), Cp : 冷却水の比熱 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$), A : 流路断面積 (m^2), v : 冷却水の流速 ($\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$)

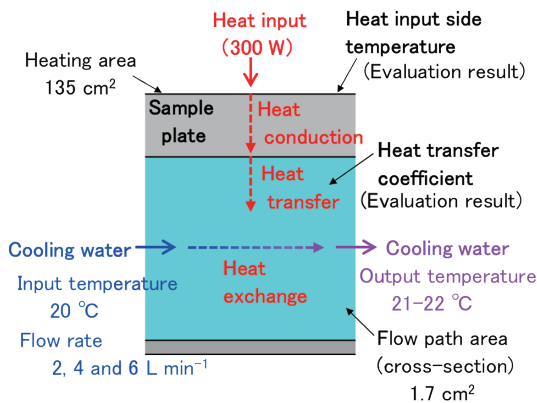


図1 熱交換試験の概略図
Schematic of the heat exchange test

2.2 熱交換性能の評価結果

図2に冷却水流量と熱伝達率の関係を示す。熱伝達率は素材間で同等で, 冷却水の流量に依存している。冷却水の流量が2, 4および6L min⁻¹と上昇するに従い, 熱伝達率はそれぞれ約1700, 2500および3400W $^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ と向上している。

図3に板厚1mmと2mmにおける冷却水流量と入熱側壁温の関係を示す。入熱側壁温は冷却水流量の上昇に従い低下し, 熱交換性能が向上する傾向である。これは図2に示す熱伝達率の向上が影響している。素材ごとの入熱側壁温は, (低) A1100 < SUS444 < SUS304L (高)の傾向であり, 熱伝達率が高い素材ほど入熱側壁温が低下し, 熱交換性能

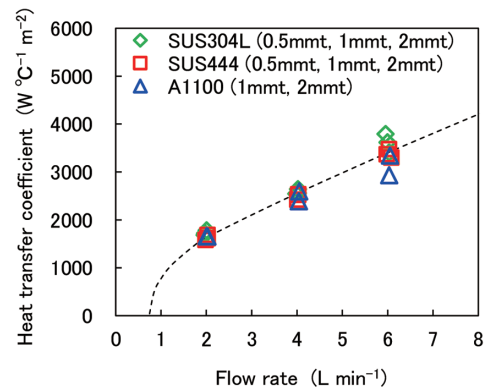


図2 冷却水量と熱伝達率の関係
Effect of flow rate on the heat transfer coefficient

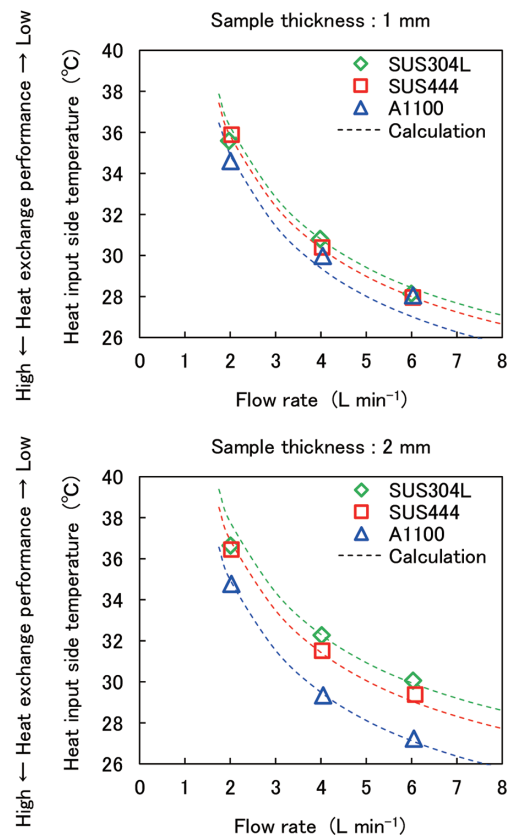


図3 冷却水量と入熱側壁温(熱交換性)の関係
Effect of flow rate on the heat exchange performance

が高くなっている。素材(熱伝導率)と冷却水流量(熱伝達率)の影響を比較すると、冷却水流量の方が大きく影響している。計算値は実験結果と概ね一致しており、本計算を用いると、熱伝導率がA1100の約1/15であるSUS304Lでも冷却水流量を約1.5倍にすると入熱側壁温が同等となる事が分かる。

図4に冷却水流量2, 4および6L min⁻¹における板厚と入熱側壁温の関係を示す。熱伝導率が低い素材ほど入熱側壁温は高くなる傾向を示す。一方、板厚を薄くすると入熱側壁温は低下し、素材間の差は小さくなる。特に板厚0.5mmにおいて、SUS444とSUS304Lの入熱側壁温は熱伝導率に応じた結果にはなっておらず、実験誤差範囲内の僅差になる。計算値は実験結果と概ね一致しており、板厚0.5mm

の場合のA1100とSUS304Lの入熱側壁温の差は、計算上で0.7℃と僅差である。

以上の結果より、伝熱方向が板厚方向である積層型プレート熱交換器やバッテリー冷却器を想定すると、冷却水流量の上昇、または薄肉化すればAl合金とステンレス鋼で熱交換性能はほぼ同等となる。

今回試験では、熱伝達率は冷却水流量が上昇すると向上し、熱交換性能に及ぼす影響は素材の熱伝導率よりも大きかった。また、板厚が薄いと素材間の差は誤差レベルとなった。これらについて、熱伝達率に影響する境界層を理解し、その厚みを計算することで考察する。

管路内の素材壁面直下では流体の粘性により素材表面との間に摩擦力が生じ、流速が低下する範囲がある。その範囲を境界層と呼び、素材壁面直下は素材に近い温度になり管路中心に向かって温度分布が生じる。管路全体の冷却水の流速が上昇すると境界層が洗い流されるかのように薄くなっていき、熱の移動が促進され、熱伝達率が向上することになる。

流体の流れには層流と乱流があり、境界層には主流とは別に層流境界層と乱流境界層がある。主流、境界層の流れの区別はレイノルズ数 Re を指標として区別され、式(6)で示される。

$$Re = v \times L / \nu \quad (6)$$

$$L = 2 \times \text{短辺} \times \text{長辺} / (\text{短辺} + \text{長辺}) \quad (\text{長方形管の場合})$$

v : 冷却水の流速 (m sec⁻¹), L : 特性長さ (m) = 水力直径,

ν : 冷却水の動粘性係数 = 1×10^{-6} (20℃の場合)

主流の指標は $Re < 2300$ で層流, $Re > 4000$ で乱流となる⁷⁾。境界層の指標は $Re < 500000$ で層流境界層, $Re > 500000$ で乱流境界層となる⁸⁾。今回の実験における Re は冷却水流量2, 4および6L min⁻¹の順に、それぞれ2897, 5841および8725となり、主流は遷移域から乱流の範囲、境界層はいずれも層流境界層である。境界層の流速 u が主流の流速 U の99%に達したときの素材表面からの距離を y とし、層流境界層の速度分布を $u = a + by + cy^2$ で近似した場合、境界層方程式⁹⁾を解いていくと、層流境界層の厚み δ (m) の計算式として式(7)が得られる。

$$\delta = 5.48 \times (v \times L / \nu)^{0.5} = 5.48 \times L \times Re^{-0.5} \quad (7)$$

式(7)を用いて今回実験における冷却水流量と境界層厚みの関係を計算した結果を図5に示す。境界層は冷却水流量の上昇に伴い薄くなり、冷却水流量2, 4および6L min⁻¹の順に、それぞれ1.5, 1.1および0.9mmとなる。素材の板厚が0.5~2mmであり、境界層の厚みは素材同等になるため無視できないことが分かる。また、熱伝導率はA1100, SUS444, SUS304Lおよび水の順に、217, 20.7, 14.7および0.5W℃⁻¹m⁻¹であり、水は素材より2桁小さい。そのため熱交換性能には境界層による熱伝達が大きく影響していると考えられる。図2における冷却水流量と熱伝達率の関係について式(7)を用いて境界層厚みと熱伝達率の関係に変

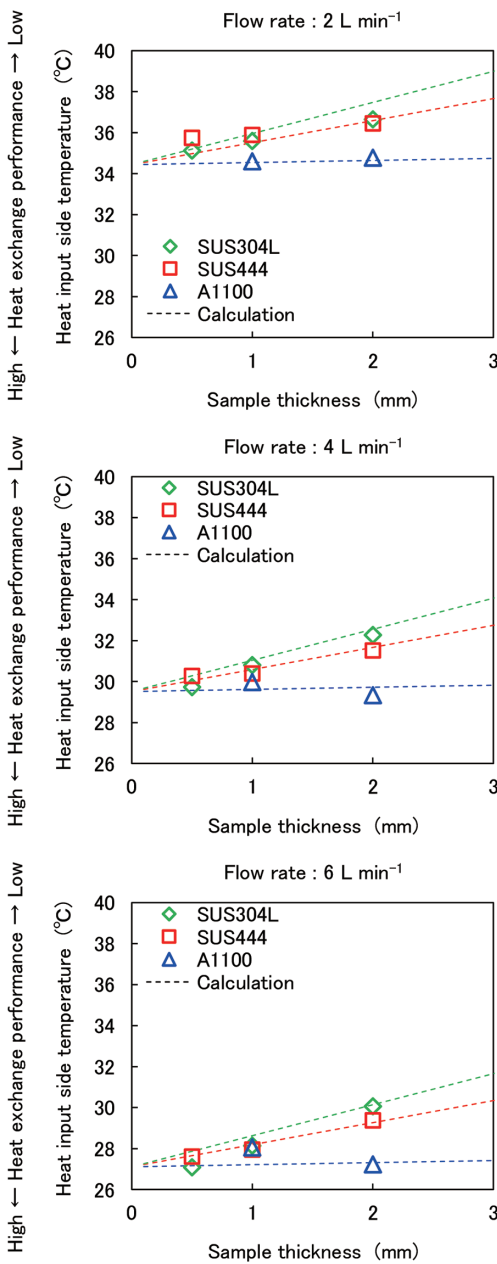


図4 板厚と入熱側壁温(熱交換性)の関係
Effect of sample thickness on the heat exchange performance

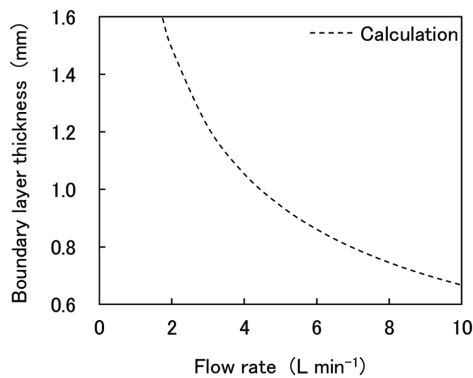


図5 冷却水流量と境界層厚みの関係
Effect of flow rate on boundary layer thickness

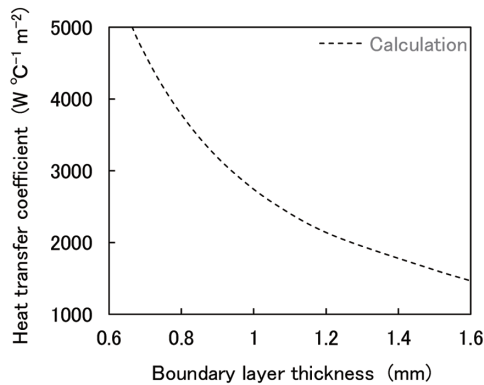


図6 境界層厚みと熱伝達率の関係
Effect of boundary layer thickness on the heat transfer coefficient

換した結果を図6に示す。冷却水流量の増加で境界層厚みが薄くなることで熱伝達率を大きく向上しており、本実験においては冷却水流量の影響が大きかった理由が理解できる。さらに、板厚が薄い0.5mmの場合は境界層の厚みが板厚より厚くなっているため熱交換性能は熱伝達率に律速され、素材の熱伝導率の影響が小さかったと考えられる。

3. 耐食性の評価

3.1 耐食性の実験方法

供試材としてAl合金はA3003 (Al-Mn系合金), A7075 (Al-Zn-Mg系合金), ステンレス鋼はSUH409L (Fe-11Cr-0.2Ti, PREN=11), SUS430LX (Fe-17Cr-0.2Ti, PREN=17), SUS436L (Fe-17Cr-1Mo-0.2Ti, PREN=21), SUS444 (Fe-18Cr-2Mo-0.5Nb, PREN=25)の4種のフェライト系ステンレス鋼を用いた。なお、 $PREN = Cr + 3.3Mo$ (mass%)である。これら供試材を用いて70mm×150mm, P600湿式研磨仕上げの試験片を作製し、Al合金の腐食試験であるSWAAT試験 (Sea Water Acidified Test, ASTM G85-A3) に供した。SWAAT試験は噴霧 (49℃, 人工海水+酢酸溶液, pH2.8~3.0, 30min) と湿潤 (49℃, 98%RH, 90min) のサイクル腐食試験である。SWAAT試験の168cyc後と336cyc後の外観観察と腐食減量および最大腐食深さを測定した。

3.2 耐食性の評価結果

図7に各供試材のSWAAT試験後の外観および最大腐食深さ、腐食減量を示す。Al合金は錆が白色であるため目立たないが外観写真でまだらに見えているのは腐食が顕著であることを示している。ステンレス鋼はSUH409Lの腐食が激しいものの、他のステンレス鋼は軽微である。また、腐食減量は (大) SUH409L > A7075 > A3003 > SUS430LX, SUS436L, SUS444 (小) であり、最大腐食深さは (大) SUH409L ≒ A7075 > A3003 > SUS430LX > SUS436L > SUS444 (小) の傾向である。また、図8にSUS430LXとA3003の孔食をSEM観察した結果を示す。SUS430LXに対してA3003の孔食は形状が不均一で大きく腐食が顕著である。

腐食による重量減少が直線則に従うと仮定し、重量減少速度を計算した結果を図9に示す。ステンレス鋼はPRENの増加に従い重量減少速度が小さくなり、 $PREN \geq 17$ であればAl合金より1桁以上小さくなる事が分かる。

腐食深さについては進展が停滞していることから放物線則に従うと仮定し、腐食深さ進展速度を計算した結果を図10に示す。ステンレス鋼はPRENの増加に従い腐食深さ進展速度が小さくなり、 $PREN \geq 17$ であればAl合金より1桁以上小さくなる事が分かる。

	A 7075	A 3003	SUH 409L	SUS 430LX	SUS 436L	SUS 444
168cyc						
D (mm)	0.51	0.41	0.54	0.045	0.033	No pit
W (mg cm ⁻²)	3.8	0.5	7.3	<0.1	<0.1	<0.1

336cyc						
D (mm)	0.80	0.63	0.83	No pit	0.026	No pit
W (mg cm ⁻²)	6.5	1.5	10.8	<0.1	<0.1	<0.1

D : Maximum corrosion depth, W : Corrosion weight loss

図7 SWAAT試験後の外観
Appearance of the specimens after the SWAAT

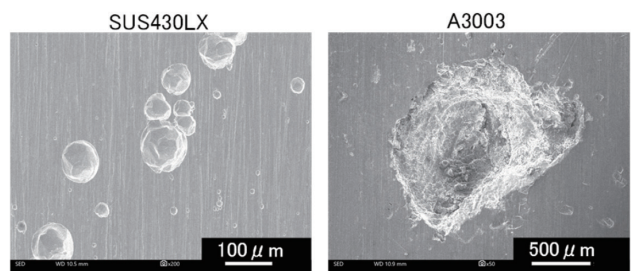


図8 SWAAT試験後の孔食の外観
Appearance of the corrosion pits after the SWAAT

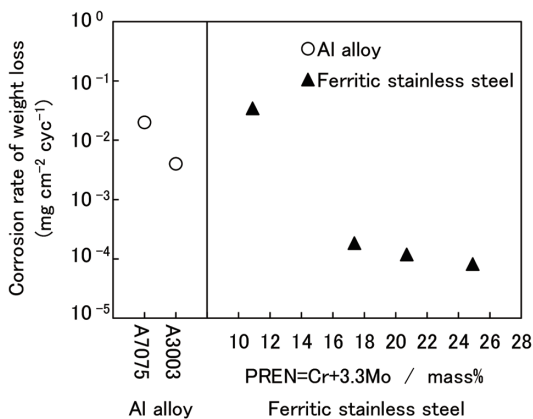


図9 SWAAT 試験における重量減少速度
Corrosion rate of weight loss calculated using the linear law in the SWAAT

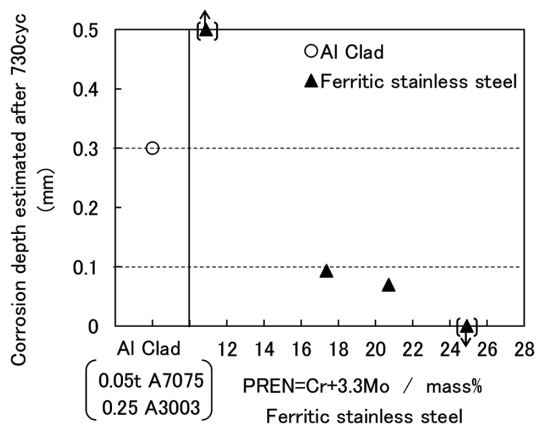


図11 SWAAT 試験 730cyc 時の腐食深さ計算結果
Corrosion depth calculated after 730 cyc in the SWAAT

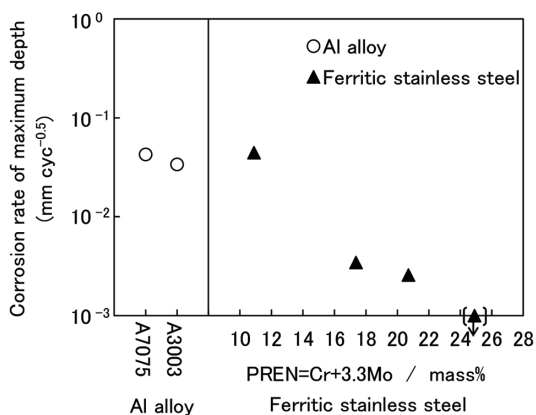


図10 SWAAT 試験における腐食深さ進展速度
Corrosion rate of the maximum depth calculated using the parabolic law in the SWAAT

上記のように、PREN \geq 17のステンレス鋼はAl合金より大幅に耐食性に優れる。ただし、Al合金はZnを含むAl合金を犠牲防食層とした複層のクラッド構造とする場合がある。ここで、芯材が板厚0.25mmのA3003で、犠牲防食層が板厚0.05mmのA7075であるクラッド板を想定する。図9の重量減少速度から0.05mmの犠牲防食層が全て消失するサイクルを計算すると、668cycと見積もられる。その後、芯材のA3003は局部腐食にて穴あきするまでのサイクルを図10の腐食深さ進展速度から計算すると、合計で730cycとなると見積もられる。730cyc時のステンレスの腐食深さを図10の腐食深さ進展速度から計算した結果を図11に示す。PREN=17であるSUS430LXは730cyc時の腐食深さが0.09mmと見積もられる。つまり、板厚0.3mmで犠牲防食層を有するAl合金に対して、PREN \geq 17のステンレス鋼であれば1/3の板厚でもSWAAT試験での耐穴あき性は同程度になると予想される。

4. 耐圧性の評価

4.1 耐圧性の解析方法

耐圧性の評価として、積層型プレート熱交換器を想定し

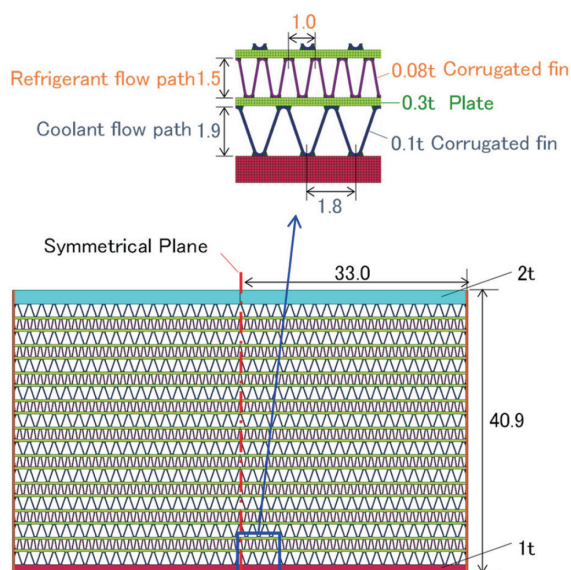


図12 熱交換器の断面形状の二次元モデル概略図
Schematic of the two-dimensional model for the pressure resistance simulation of the plate-type heat exchanger

た形状にて冷媒圧力を変化した場合の変形をシミュレーションした。図12に熱交換器の断面形状を1/2対称形状として二次元モデル化(MARC, 有限要素法)した概略図を示す。素材データとしては、A3003 (Al-Mn系合金)を600 $^{\circ}$ C \times 5minのろう付け模擬熱処理した材料の応力-歪曲線(ヤング率70GPa, 0.2%耐力23MPa)とSUS430J1L (Fe-18.5Cr-0.4Cu-0.4Nb)を1130 $^{\circ}$ C \times 10minのろう付け模擬熱処理した材料の応力-歪曲線(ヤング率210GPa, 0.2%耐力292MPa)を使用した。冷却液流路内の圧力を0.1MPa一定とし、冷媒流路内の圧力を上昇させてコルゲートフィンの変形をシミュレーションした。また、プレートおよびコルゲートフィンの板厚を1/3倍, 2倍にした場合のシミュレーションも行い、コルゲートフィンに塑性歪が生じる冷媒圧力を計算した。

4.2 耐圧性の評価結果

図 13 にシミュレーション結果の一例として、冷媒圧力 10MPa 時の A3003 の相当塑性歪のコンタ図を示す。冷媒流路は中心側では上下に膨張、側面側では上下左右に歪んで膨張している。また、塑性歪は板厚が薄いコルゲートフィンに集中している。図 14 に冷媒圧力と冷媒流路のコルゲートフィンにおける相当塑性歪の関係を示す。A3003 は約 4MPa、SUS430J1L は約 40MPa から塑性歪が上昇し始めている。この結果より、SUS430J1L の耐圧性は A3003 の約 10 倍であると推定され、高耐力の影響と考えられる。図 15 にプレートおよびコルゲートフィンの厚みとコルゲートフィンに塑性歪が生じる冷媒圧力の関係を示す。SUS 430J1L は A3003 より塑性歪が生じる圧力が高い。A3003 製の 0.3mmt プレート、0.08mmt コルゲートフィンを基準

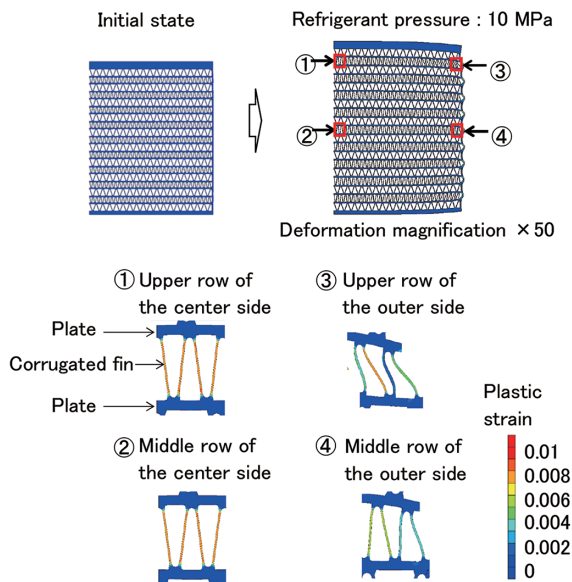


図 13 冷媒圧力 10MPa 時の A3003 の相当塑性歪コンタ図
Plastic strain contour map for the heat exchanger made of A3003 at 10 MPa refrigerant pressure

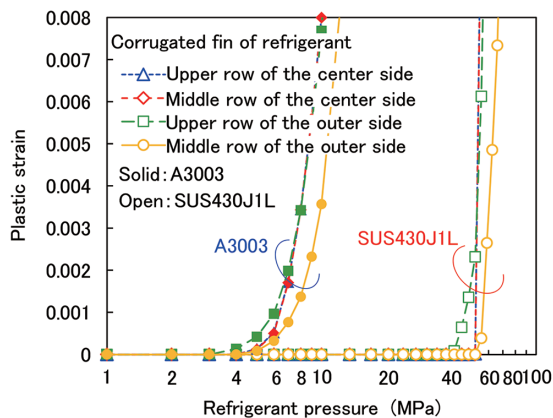


図 14 冷媒流路のコルゲートフィンにおける冷媒圧力と相当塑性歪の関係
Effect of refrigerant pressure on the plastic strain of corrugated fins made of A3003 and SUS430J1L

とした場合、SUS430J1L は 1/3 倍の板厚でも同等以上の耐圧性があると考えられる。また塑性歪が生じる冷媒圧力は板厚に比例関係である。例えば、上記 A3003 基準に対し 6 倍の耐圧性が必要とした場合、A3003 は各板厚を 6 倍にする必要がある。一方、SUS430J1L は基準板厚ままでも耐圧性が担保され、冷媒の種類や冷却能に応じた部品内部の高圧化^{3,4)}に対応可能であると推定される。

5. 結 言

本研究では熱マネジメント部品を想定して、Al 合金とステンレス鋼を用いて熱交換性能、耐食性、耐圧性の評価を行い、以下の結果を得た。

- (1) 熱交換性能は板厚が薄くなるほど向上し、素材間の差は小さくなった。0.5mmt においては Al 合金とステンレス鋼の差は僅差であった。
- (2) SWAAT 試験による耐食性評価の結果、PREN (Cr+3.3Mo) ≥ 17 であるステンレス鋼 (SUS430LX, SUS436L, SUS444) の腐食減量や腐食深さは、A3003 より 1 桁以上小さく良好な耐食性を示した。
- (3) 積層型プレート熱交換器の断面形状で耐圧性をシミュレーションした結果、コルゲートフィンに塑性変形が生じる冷媒圧力は SUS430J1L が A3003 の約 10 倍と高く、ステンレス鋼の方が耐圧性に優れる。

上記結果から、板厚が薄い熱マネジメント部品においては Al 合金だけでなくステンレス鋼も適用可能であると考えられる。また、ステンレス鋼を適用することで部品の薄肉化、コンパクト化、高耐圧化への対応、腐食環境が異なる多様な地域での部品使用が可能となり、EV の熱マネジメントに貢献可能であると考えられる。

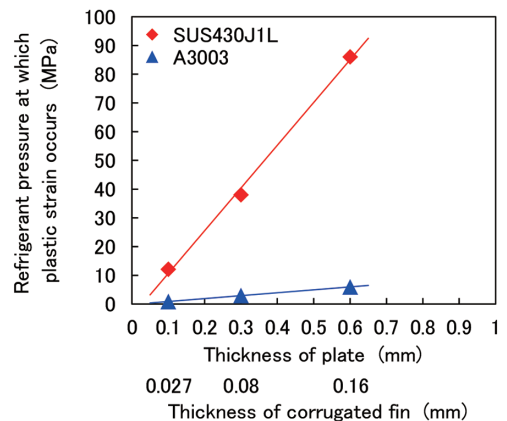


図 15 プレートおよびコルゲートフィンの厚みと塑性歪が生じる冷媒圧力の関係
Effect of refrigerant pressure at which plastic strain occurs on the thickness of plates and corrugated fins

参考文献

- 1) 川和田達也, 渡辺亮: 充電時の冷却による EV 用リチウムイオンバッテリーの劣化抑制. 自動車技術会論文集, 47 (1), 133-137 (2016)
- 2) 張莉: 電気自動車用蓄電池の冷却方法の調査. 電力中央研究所報告書. 東京, 電力中央研究所, 2020, 22p
- 3) 原潤一郎 ほか: CO₂ 冷媒エアコン, 自動車熱マネジメント・空調技術. 東京, サイエンス & テクノロジー, 2019, p.333-341
- 4) 足立高弘, 上原春男: 平板に周期的な凹凸を設けた流路内流れの圧力損失と熱伝達. 日本機械学会第 13 回計算力学講演会講演論文集. 2000, p.139-140
- 5) Ando, Y., Nita, I., Uramoto, M., Ochiai, H., Fujiyoshi, T.: Development of Aluminum Radiators Using the Nocolok Brazing Process - Corrosion Resistance of New Aluminum Radiators by Applying a Nocolok Brazing Process. SAE Technical Paper, 1987, 1987-02-870180, doi:10.4271/870180
- 6) 日本機械学会: 伝熱ハンドブック. 東京, 丸善, 1993, 429p
- 7) Jack Philip Holman: Heat Transfer. New York, McGraw-Hill, 2002, 665p
- 8) Frank P. Incropera, David P. DeWitt: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, New York, Wiley, 1990, 992p
- 9) 浅野康一: 物質移動の基礎と応用. 東京, 丸善, 2004, 274p

この論文は自動車技術会学術講演会 講演予稿集, 2024 年秋季大会, 講演番号 124, 文献番号 20246124 に掲載の「熱マネジメント部品を想定したアルミニウムとステンレス鋼の熱交換性評価」を転載し, 一部加筆した内容である。



林 篤剛 Atsutaka HAYASHI
山口技術研究部 ステンレス薄板研究室
商品研究課長
山口県光市大字島田3434 〒743-8550



田母神剛 Tsuyoshi TAMOGAMI
日鉄テクノロジー(株)
研究試験事業所
エレクトロニクス材料ソリューション部
電池・エレクトロニクス材料評価室 主幹



濱田純一 Jun-ichi HAMADA
山口技術研究部長 博士(工博)