



# オーステナイト系ステンレス鋼の省ニッケル化

大嶋 貴之\*・羽原 康裕\*・黒田 光太郎\*<sup>2</sup>

Efforts to Save Nickel in Austenitic Stainless Steels

Takayuki OSHIMA, Yasuhiro HABARA and Kotaro KURODA

**Synopsis :** The price of nickel is maintaining high level due to the demand continuing to outstrip supply, therefore the stainless steel, which is the largest consumer of nickel, has been maintaining a high-price.

In this paper, the way of nickel saving by more than half and the comparison of properties between the nickel saving stainless steels and the SUS304 were reviewed, and the problem caused by the use of the nickel saving stainless steels were discussed.

Nickel saving stainless steels have the following 4 types; martensitic stainless steels, ferritic stainless steels, duplex stainless steels and Cr-Mn-Ni austenitic stainless steels. Nickel saving stainless steels have both superior and inferior points as compared to SUS304, however they have a large possibility of substitution for SUS304. Further expansion of the use of nickel saving stainless steels is expected if the properties required for the stainless steel are reconsidered for proper demands.

**Key words:** nickel saving; austenitic stainless steel; ferritic stainless steel; martensitic stainless steel; duplex stainless steel; manganese; mechanical property; pitting potential; workability.

## 1. はじめに

Ni金属は電気・電子部品、めっき材料、耐熱鋼の添加合金元素、およびNi基超合金などに利用されており、非常に有用な金属元素のひとつである。その中でも、Ni金属の最大の需要家はステンレス鋼であり、その比率は約60%に達する。

2004年度の世界のステンレス鋼の総生産量が2400万トンを超え、2005年度は2500万トンを超えると見積もられている。これら全ステンレス鋼の約70%をオーステナイト系ステンレス鋼が占め、さらに、その多くがSUS304と呼ばれる18%Cr-8%Niが占めている。

オーステナイト系ステンレス鋼にはNiが多く含まれており、その原料価格はステンレス鋼価格の約40~45%も占めている。Fig. 1に示すように、近年、LME (London Metal Exchange) におけるNi原料価格が上昇し、現在では、1600円/kg前後で高留まりしている。これは、中国をはじめとするアジア地区における旺盛なステンレス需要の拡大による需給バランスの崩れだけでなく、Niが投機の対象になっていること<sup>1)</sup>も原因と言われている。

ステンレス鋼メーカーは、Ni価格が上昇すると、それを含むオーステナイト系ステンレス鋼の価格を増加させざるを得なくなる。そのため、ステンレス鋼ユーザーは素材価格の増加を嫌って、Niを節減した代用ステンレス鋼の

利用を検討する。または、ステンレス鋼から他の金属材料への転換を検討するともあり得る。

過去に、Ni原料価格の高騰期やNi使用制限などの時期に、オーステナイト系ステンレス鋼のNi節減（以下、省Ni）の動きがあり、フェライト系への転換の試み<sup>2)</sup>や、オーステナイト系ステンレス鋼に含有されるNiをNやMnで代替した鋼種<sup>3-7)</sup>が多く開発された。

ところで、最も多く使用されているSUS304は、価格、加工性および耐食性に優れたステンレス鋼で、その用途は、家庭用品、建築用、自動車部品、化学工業、食品工業など

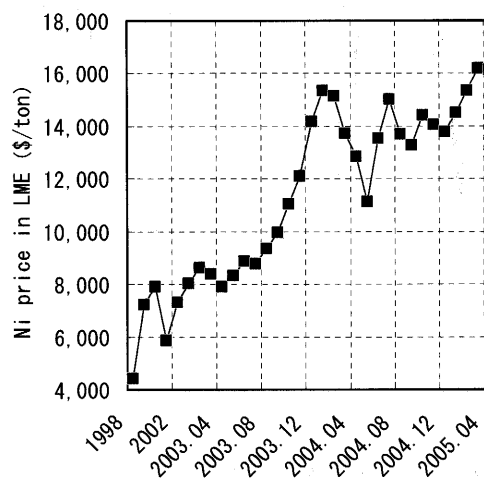


Fig. 1. The variation of Ni price in LME.

平成17年9月22日受付 平成17年11月30日受理 (Received on Sep. 22, 2005; Accepted on Nov. 30, 2005)

\* 日本金属工業(株)技術開発部商品開発室 (Products of Development Section, Technical Development Department, Nippon Metal Industry Co., Ltd., 1-30 Oyama-cho Sagami-hara 229-1184)

\* 2 名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻 (Department of Quantum Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University)

広範囲にわたっている。しかし、その機械的性質、耐食性および成形性などの特性すべてを必要としている用途は多いとは言えない。これは、SUS304の特性の一部が同等であれば、SUS304に取って代わることが出来ることを示している。

ここで検討する省Niは、現在、最も多く使用されているSUS304 (8% Ni) を対象とする。そして、このステンレス鋼の省Ni化の手段とその特性をSUS304と比較し、その課題について紹介する。

また、省Niとは別の観点で、Niアレルギーなどの対策として、Niフリーステンレス鋼の研究開発が行われている<sup>8-11)</sup>が、今回、これらには触れない。

## 2. 省Ni化の手段

ステンレス鋼は成分や組織で分類される。Fig. 2 に分類例を示す。含有成分で分類するとCr系 (SUS400番)、Cr-Ni系 (SUS300番)、Cr-Mn-Ni系 (SUS200番) および析出硬化系 (SUS600番) に分けられる。更に、Cr系とCr-Ni系は金属組織で分類され、前者は、マルテンサイト系とフェライト系、後者はオーステナイト系、フェライト-オーステナイト系 (以下、二相系) がある。

今回、検討する省Ni化はSUS304に対してである。ここでは、省Ni候補としてNi含有量の半減が見込める鋼種を対象とした。なお、ここに挙げる省Ni化候補の多くは、省Ni化を目的として開発されたものではないことを付記する。

Cr系はNiをほとんど含有しないので、省Niとなる。一

方、Cr-Ni系は、Niを含有しているが、二相系は、Ni含有量がSUS304に比べ、低くなっており、省Niとなっている。また、Cr-Mn-Ni系は、Niの一部、または全部をMnやNなどのオーステナイト形成元素で代替したステンレス鋼であり、オーステナイト組織を有している。

以上のように、省Ni化の手段として、次の4つが挙げられる。1. マルテンサイト系、2. フェライト系、3. 二相系、および4. Cr-Mn-Ni系である。

## 3. 省Ni鋼種の特性と課題

Table 1 に省Ni化候補の代表的な鋼種の成分を示す。また、Table 2 からTable 4 に、それぞれの機械的性質、冷間加工性および孔食電位の測定例を示す。なお、マルテンサイト系を除いて、いずれも2B仕上げの冷延板を用い、それぞれJISに準拠して測定した。また、これらは、製造工

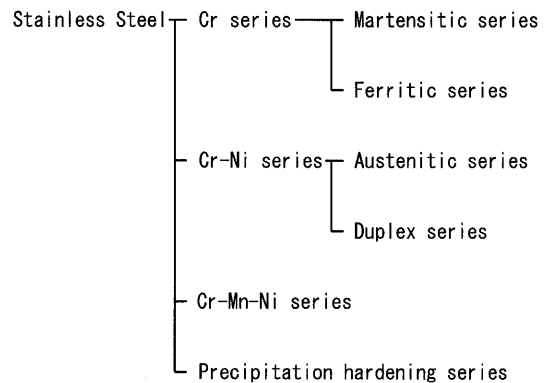


Fig. 2. Series of stainless steels.

Table 1. Chemical compositions (mass%).

Series		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N
Martensitic	SUS420J2	0.26~0.40	≤1.00	≤1.00	≤0.60	12.00~14.00	—	—
Ferritic	SUS430	≤0.12	≤0.75	≤1.00	—	16.00~18.00	—	—
Duplex	SUS329J1	≤0.03 0	≤1.00	≤1.00	4.00~6.00	23.00~26.00	1.00~2.50	≤0.15
Cr-Mn-Ni	SUS201	≤0.15	≤1.00	5.50~7.50	3.50~5.50	16.00~18.00	—	≤0.25
Cr-Ni	SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	8.00~10.50	18.00~20.00	—	—

Table 2. Mechanical properties.

Series		Tensile strength MPa	0.2% proof stress MPa	Elongation %	Hardness HV
Martensitic <sup>12)</sup>	SUS420J2*	922	814	20	252
Ferritic	SUS430	500	343	30	160
Duplex	SUS329J1	814	588	25	275
Cr-Mn-Ni	SUS201	805	377	56	185
Cr-Ni	SUS304	618	314	59	170

\* : after quenching and tempering.

Table 3. Cold workabilities.

Series		Ericksen value:mm	Conical cup value:mm
Ferritic	SUS430	9.0	40.0
Duplex	SUS329J1	9.5	40.0
Cr-Mn-Ni	SUS201	13.0	37.8
Cr-Ni	SUS304	13.2	38.0

Table 4. Pitting potentials (V vs. SCE).

Series		300ppmCl <sup>-</sup> at 30°C	1000ppmCl <sup>-</sup> at 80°C
Ferritic	SUS430	0.37	0.11
Duplex	SUS329J1	≥1.0	≥1.0
Cr-Mn-Ni	SUS201	0.35	0.19
Cr-Ni	SUS304	0.54	0.20

程、製造条件や成分によって変化する場合がある。

### 3.1 Cr-Ni オーステナイト系

Cr-Ni オーステナイト系は、延性および韌性に富み、降伏比が小さく、深絞りや曲げ加工などの冷間加工性が良好で、溶接性も優れている。また、耐食性、高温および低温における特性も優れている。これらの特性を有することはCr-Ni オーステナイト系ステンレス鋼が、ステンレス鋼全体の約70%を占める所以であろう。そして、その代表がSUS304である。

オーステナイト系ステンレス鋼では、冷間成形品が数分から数ヶ月後に割れる時期割れ<sup>13)</sup>、応力腐食割れ<sup>14)</sup>や錆が発生することがある。これらは材質だけでなく、加工条件や環境にも影響されて起きる現象である。

このように、ステンレス鋼として優れた性質を有し、広く一般的に使用されているCr-Ni系でも、正しい知識の基で使用しないと、事故に繋がる可能性があるため、注意しなければならない。

### 3.2 マルテンサイト系

マルテンサイト系の主な用途には、刃物、タービンブレード、耐摩耗部品、シャフト、バルブ、ベアリングなど、高強度および高硬度が必要となる用途が多い。

Table 2に示した機械的性質は焼入焼戻し後の機械的性質であるが、熱処理条件によって機械的性質は変わる<sup>12)</sup>。なお、冷間での成形加工は、焼鈍状態では可能であるが、その後の焼入れによるスケールや変形が問題となる場合がある。また、焼入後の成形は、不可能に近い。

一方、耐食性は他のステンレス鋼よりも劣り、屋内空間など、非常に弱い腐食環境でのみ耐食的である。

マルテンサイト系は、強度を必要とする構造部材などの用途には適用できる。しかし、溶接は容易でなく、熱影響部が硬化し、冷間割れや粒界腐食を起こし易くなる。

以上のように、マルテンサイト系は耐食性および加工性がSUS304に比べて、大きく劣るため、これをSUS304の代替として適用できる用途は非常に少ない。

### 3.3 フェライト系

SUS430に代表されるフェライト系の用途は、厨房機器

や食器類、家電用機器および建築用金物などに広く使用されている。

SUS430の耐食性(孔食電位)は、Table 4に示すように、SUS304ほど高くないが、屋内にて、日常生活品として使用する分には十分に耐食的である。また、CrやMoを添加し、SUS304以上の耐食性を有したフェライト系もあり、海浜地区で使用されている。さらに、応力腐食割れが生じにくいという利点がある。

また、冷間成形性では、絞り加工の指標であるランクフォード値( $r$ 値)が、成分や製造条件の最適化<sup>15-18)</sup>によって、SUS304よりも高くなる。しかし、加工品において、リジング(ローピング)<sup>19-23)</sup>や脆性割れ(縦割れ)が発生することがある。

このように、フェライト系は耐食性および絞り加工の用途に関しては、SUS304の代替になり得る。

しかし、フェライト系の課題は強度および溶接性にある。Table 2に示すように、フェライト系はSUS304よりも強度が低く、韌性が劣るため、強度部材にはあまり適さない。

また、SUS430などの溶接性は、溶接部にマルテンサイトが生じるため、延性や韌性が低下する。さらに、ほとんどのフェライト系では、熱影響部は粗粒化し、曲げ性や韌性が劣り<sup>24)</sup>、粒界腐食が生じやすくなる<sup>25-27)</sup>。このため、SUS304などのCr-Ni系とは異なる溶接管理が必要となる。

以上のようにフェライト系は、CrやMoを調整することによって、マイルドな環境から厳しい腐食環境まで、十分な耐食性を有し、絞り加工であれば、SUS304の代替となり得る。また、応力腐食割れ感受性の低いことも有利である。しかし、強度を必要とする用途や張出しを伴う加工品への適用は難しく、また、溶接性、特に溶接部周辺では、金属組織の硬化あるいは粗大化が生じるため注意が必要である。

### 3.4 二相系

二相系はオーステナイト相およびフェライト相よりなる複合組織を持つステンレス鋼である。そして、耐孔食、耐隙間腐食、耐粒界腐食および耐応力腐食割れに優れている<sup>28-32)</sup>ため、その用途は化学プラント関係、熱交・配管関係、海浜地区の建築物など厳しい腐食環境で使用されている。

Table 2およびTable 3に示すように、その冷間加工性は、フェライト系に近い。また、耐力が高く、変形抵抗が大きいため、SUS304と同じ加工方法では成形できない場合や、プレス機などの金型寿命や成形後のスプリングバックなどが異なると思われる。

また、溶接性は良好である。強度、韌性とも母材並みである<sup>33)</sup>が、熱影響により相比率が変化するために、耐食性や韌性が低下することがあるので注意が必要である。

一方、熱間加工中、または加工後の冷却時に、 $\sigma$ 相が析出し<sup>34-37)</sup>、韌性を著しく低下させる。特に、加工歪は $\sigma$ 相

の析出を促進する<sup>38,39)</sup>。

さらに、熱間加工時に割れが発生しやすく、歩留りが低いため、現在のMo高騰期に限らず、二相系は高価なステンレス鋼である。

以上のように二相系は、耐食性や強度という観点では、SUS304を上回っているが、製造性が悪く、多くのMoを含有するため、価格に見合った用途に使用されるべきである。そのため、耐食性をやや下げてでも、安価な二相系の開発という視点が必要と思われる。

### 3.5 Cr-Mn-Ni系

Cr-Mn-Ni系はオーステナイト組織を有するステンレス鋼であり、Table 1に示すように、Niを減らす代わりにC, N, Mnを添加して、オーステナイト組織を維持している。しかし、その用途は限定的で、現在では、バネ用や電子・電気部品に使用されているに過ぎない。そして、これらは、省Ni鋼としてではなく、Cr-Mn-Ni系の高強度非磁性鋼としての特性を生かした用途である。

ところで、MnおよびCuのオーステナイト形成力は大きくない<sup>7,40,41)</sup>ので、CおよびNにオーステナイト形成を頼ることになる。そのため、Table 2に示すように、その機械的性質、特に耐力は、SUS304よりも高くなる。しかし、MnやCuを添加することによって、耐力を低下させる<sup>42)</sup>ことができる。

また、Table 3に示すように、冷間成形性は、SUS304とほぼ同等である。しかし、耐力が高いので、変形抵抗や加工硬化はSUS301並となる場合がある<sup>43)</sup>。そのため、プレス機械などの金型寿命や加工品のスプリングバックは、SUS304と同等でない場合がある。また、Cr-Ni系同様に、成形後、時期割れが発生することがある。

その他に、高温強度はSUS304などのCr-Ni系よりも高いが、Mnが多く添加されているため、高温酸化に対する抵抗は低い<sup>44-47)</sup>ので、高温部での使用には注意が必要である。一方、高N鋼では、オーステナイト合金にもかかわらず、延性-脆性遷移温度が現れる<sup>48,49)</sup>。

なお、溶接はSUS304とほぼ同様に可能であり、その品質も変わらない<sup>50,51)</sup>ため、特別な管理などは必要としない。そして、Mn添加鋼は、Cの固溶量が大きいため、粒界腐食感受性はSUS304よりも鈍感である<sup>43)</sup>。

一方、耐食性はFig. 3に示すように、孔食電位が、Cr+3.3Mo+30N-Mn(%)<sup>42,52,53)</sup>に比例していることから、Mnは耐食性を下げる作用があると言える。また、薬品に対する耐食性に関しては、Niの低下およびMnの増加は、その腐食減量を大きくする<sup>43)</sup>ので、その適用には注意が必要である。ただし、屋内や内陸部などの比較的マイルドな環境では、十分に耐食的<sup>54)</sup>であり、適用は可能である。そして、耐食性は、CrやMo、またNの添加によって改善できる。なお、Cr-Ni系と同様に、応力腐食割れの生じる場合がある。

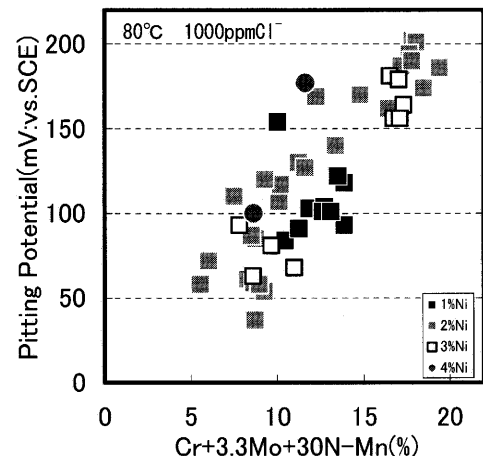


Fig. 3. Effects of alloy elements on pitting potential in Cr-Mn-Ni austenitic stainless steels.

Cr-Mn-Ni系の最大の特徴は、加工誘起マルテンサイト変態( $\alpha'$ )が発生しにくいことである<sup>54)</sup>。このため、上述した高強度非磁性鋼として、バネ用や電子・電気部品としての用途展開が進んでいる。

ところで、Cr-Mn-Ni系の研究開発の歴史は長いにもかかわらず、現在、適用されている用途は限定的である。これは、その製造性に課題が多くあり、Niを節減した分のコストメリットが得られ難かったことが要因<sup>55)</sup>と言えるが、近年の精錬技術や圧延技術の向上によって、これら製造性の改善が進んでいる。

以上のようにCr-Mn-Ni系は、強度および成形性において、SUS304とほぼ同等の特性を有しており、屋内や内陸部のマイルドな環境では十分SUS304の代替として利用することが可能と思われる。

## 4. 省Ni化の今後の動向

### 4.1 フェライト系

フェライト系は耐食性では、SUS304と同等以上の特性を有することも可能であるが、加工性や強度で制約があり、現在、Cr-Ni系が多くを占めている分野へ進出するためには、これらを克服する必要がある。

フェライト系に強度を付与するために、フェライトとマルテンサイトの二相組織としたステンレス鋼が開発されている<sup>56,57)</sup>。

一方、従来、SUS304と同等の耐食性を得るためにCrとMoを添加していたところを、高価なMoの添加を避け、Crを多く添加することによって、SUS304と同等の耐食性を得、さらに、低C、低NおよびTi添加によって溶接性を改善したフェライト系を開発し、結果的に、SUS304よりも安価であることを強調した鋼種もある。但し、強度や加工性の課題はクリアできていない。

フェライト系はオーステナイト系と結晶構造が異なるの

Table 5. Comparison of properties of SUS304 with those of stainless steels to save nickel.

	SUS420J2	SUS430	SUS329J1	SUS201	SUS304	Note	
Structure	Martensite	Ferrite	Ferrite+ Austenite	Austenite	Austenite		
Corrosion resistance	×	○	◎	△	○	Depend on alloy elements and environments	
	S. C. C sensitivity	○	Insensitive	Insensitive	○		Depend on conditions
	Oxidation	△	○	-	△		○
Strength	High temp.	△	×	brittle	◎	○	
	Room temp.	High*	Low	High	High	○	*:After quenching and tempering
	Low temp.	brittle	brittle	brittle	○	○	
	Fatigue	△	△	△	○	○	
Work- Ability	Drawability	×	◎	×	○	○	
	Stretch- ability	×	×	×	○	○	
	Weldability	×	△	○	○	○	
	Season cracking sensitivity	-	Insensitive	Insensitive	Possess	Possess	
Magnetism	Possess	Possess	Possess	None	None		
Productivity	○	○	×	○	○		
Cost	Cheap	Cheap	Expensive	Cheap	-		

◎:superior to SUS304

○:almost equal to SUS304

△:a little inferior to SUS304 ×:inferior to SUS304

で、変形機構、磁性、低温脆性などの性質に違いがあり、その用途分野は異なっている。

#### 4.2 Cr-Mn-Ni系

Cr-Mn-Ni系は、耐食性がやや劣ることがある<sup>43)</sup>が、これは添加元素や環境による影響で評価が変わる。このことを考慮に入れると、強度および成形性において、SUS304と同等であるCr-Mn-Ni系は有利と思われる。

近年、インドや中国を中心に、Cr-Mn-Ni系が拡大している。このステンレス鋼も含め、200系ステンレス鋼と称される。そして、2004年5月に韓国で開催されたISSF (International Stainless Steel Forum) によれば、200系ステンレス鋼は2003年度のステンレス粗鋼生産の7.5%に達している。この200系ステンレス鋼は1~5%のNiを含有しており、それほど耐食性が不要でない食器や建材用のパイプ用途に使用されている。しかし、Cr-Mn-Ni系の加工性や耐食性に関するデータは、Cr系やCr-Ni系ほど豊富ではないので、更なる用途拡大のためには、それに応じたデータの収集および整備が必要である。

Mn添加ステンレス鋼の研究は、1912年から始められ<sup>58)</sup>、そして、近年の研究開発の方向は2種類あるとされている<sup>59)</sup>。一つは、Mn添加によって、非磁性や高強度などの新たな機能が付加されたステンレス鋼であり、もう一つが、省Niとしてのステンレス鋼である。

Cr-Ni系では、成分と特性との関係、例えばNi当量とCr

当量<sup>60,61)</sup>、 $Md_{30}$ <sup>62,63)</sup>、機械的性質<sup>64,65)</sup>などが線形式で表現され、新鋼種開発の指針としてよく使用されている。しかし、Cr-Mn-Ni系に関しては、そのような成分と特性とを結びつける関係はほとんど提案されていない。同じオーステナイト組織を有する材料であっても、微量元素としてMnが添加されているCr-Ni系で研究された関係が、積極的にMnを添加したCr-Mn-Ni系にも同様に適用できるとは限らない。そこで、適正な特性を有する成分設計を迅速に行うためにも、Cr-Mn-Ni系の特性に及ぼす合金元素の影響を広い範囲で把握し、Cr-Ni系と同様に、成分と特性の関係を得ることも、同鋼の用途拡大には必要と思われる。

なお、市場で発生する屑の管理について、Cr-Ni系と区別が付きにくいという課題が指摘されている<sup>1)</sup>。しかし、屑の選別のために、携帯型のX線分析装置<sup>66)</sup>や化学分析キットなどの簡易分析方法がいくつか開発されており、その活用も広がりつつある。これらを活用した屑の管理方法の確立が、この鋼種の用途拡大の一つの鍵を握っていると言える。

#### 5. まとめ

Niは希少な金属元素である。そして、Ni自身の特性、または合金元素として添加した場合の作用を生かすため、

Niは、真に必要な合金系に安定的に、かつ適正価格で供給されて、有効に活用されなければならない。そのひとつの手段が、オーステナイト系ステンレス鋼の省Ni化と考えられる。

2004年度のステンレス鋼用途別統計年表の用途別鋼種構成<sup>67)</sup>によると、Cr-Ni系は建設用、産業用機械・器具、船舶用および鉄道車両用など、構造部材として強度が必要となる用途に使われており、一方、Cr系は、その80%以上が自動車および輸送機械・器具向け用途となっている。このように鋼種別の用途に、偏りがあるということは、用途に合った特性を持つ鋼種が選定され、利用されていると考えられる。

現在のステンレス鋼における省Ni化の流れは、フェライト系とCr-Mn-Ni系が主流であり、一部では、二相系の検討も行われている。Table 5に示すように、いずれの省Ni化候補となる鋼種も、SUS304のすべての特性を満足するものではない。しかし、ある特性に注目すれば、SUS304と同等、またはそれ以上の特性を有しており、用途によっては、十分に代替できると思われる。このため、用途に必要な特性を見極めることによって、今後、これら省Ni化鋼種の適用範囲が広がると思われる。

## 文 献

- 1) T.Nagai: *The Special Steel*, **53** (2004), 4.
- 2) J.Parina, Jr.: *Metal Prog.*, **9** (1952), 97.
- 3) R.Franks, W.O.Binder and J.Thompson: *Trans. Am. Soc. Met.*, **47** (1955), 231.
- 4) R.A.Lincoln: *Iron Age*, (1953), 129.
- 5) D.J.Carney: *Steel*, **137** (1955), 138.
- 6) A.Makino: *The Special Steel*, **19** (1970), 55.
- 7) M.Arakawa, M.Yamaguti, T.Nishida, H.Sumitomo, Y.Sawatani and K.Ooka: *Seitetsu Kenkyu*, **292** (1977), 29.
- 8) P.J.Uggowitzer, R.Magdowski and M.O.Speidel: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 901.
- 9) T.Koga, T.Shimizu and M.Okabe: *Denki Seiko*, **67** (1996), 75.
- 10) D.Kuroda, T.Hanawa, S.Takemoto and K.Asami: *Mater. Trans.*, **44** (2003), 2671.
- 11) I.Woo, T.Horinouchi and Y.Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 29.
- 12) ステンレス鋼便覧 第3版, ステンレス協会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1995), 499.
- 13) 青山春男: 第118回・119回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1987), 234.
- 14) 須永寿夫: ステンレス防止鋼の損傷とその防止, 日刊工業新聞社, 東京, (1972), 7.
- 15) I.Gokyu, K.Suzuki, S.Ino and K.Shimizu: *J. Jpn. Inst. Met.*, **34** (1970), 520.
- 16) Y.Sawatani, K.Shimizu, T.Nakayama and M.Miyoshi: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 843.
- 17) Y.Sawatani, S.Minamino and M.Yamamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 759.
- 18) Y.Sawatani, H.Yoshimura, T.Ashiura, M.Ishii, M.Wakamatsu and A.Yamamoto: *Seitetsu Kenkyu*, **310** (1982), 335.
- 19) M.Matsuo: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **19** (1980), 192.
- 20) M.Koiike, Y.Maehara, K.Kaneko and H.Fujikawa: Proc. Int. Conf. on Stainless Steel, ISIJ, Tokyo, (1991), 864.
- 21) K.Kimura, A.Yamamoto, T.Takeshita and J.Harase: *Shinnittetsu Giho*, **361** (1996), 9.
- 22) Y.Uematsu, T.Nakamura, H.Hujimoto and K.Hoshino: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **66** (1992), 12.
- 23) J.Harase and T.Takeshita: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1528.
- 24) H.Ishida and S.Iizumi: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **21** (1969), 71.
- 25) K.Miyakusu, Y.Uematu and K.Hoshino: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **26** (1986), 228.
- 26) K.Miyakusu, Y.Uematu and K.Hoshino: Proc. 13th Biennial Congress IDDR, (1984), 178.
- 27) K.Hoshino, Y.Uematsu and K.Miyakusu: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **50** (1984), 107.
- 28) K.Harada: *Corros. Eng.*, **26** (1977), 721.
- 29) S.Kaneko and Y.Kamata: *Chemical Engineers*, **33** (1969), 104.
- 30) K.Harada and M.Sugimoto: *J. Jpn. Inst. Met.*, **29** (1965), 367.
- 31) J.M.Nicholls: Proc. Conf. Duplex Stainless Steels, Glasgow 1994, WI, (1995), 5.
- 32) T.Suzuki and H.Hasegawa: *J. Jpn. Inst. Met.*, **32** (1968), 1171.
- 33) K.Harada: *Kouatsuryoku*, **8** (1970), 40.
- 34) M.B.Cortie and E.H.Jackson: *Metall. Mater. Trans. A*, **28A** (1997), 2477.
- 35) J.Chino, M.Ihida and H.Iwata: *Tetsu-to-Hagané*, **75** (1989), 1936.
- 36) J.E.Truman and K.R.Pirt: Proc. Conf. Duplex Stainless Steels, St-Louis 1982, ASM, (1983), 113.
- 37) Y.Ohmori and Y.Maehara: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 428.
- 38) T.Ito, R.Matsuki and H.Aoyama: Proc. Stainless Steel '99 Science and Market 3rd European Congress, Italy, Vol. 2, (1999), 1.
- 39) T.Ito, H.Aoyama and R.Matsuki: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 464.
- 40) T.Oshima, T.Hamada, A.Kimura, Y.Habara and K.Kuroda: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 1584.
- 41) A.D.Schino, M.G.Mecozzi, M.Barteri and J.M.Kenny: *J. Mater. Sci.*, **35** (2000), 375.
- 42) T.Oshima, A.Kimura and Y.Habara: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 607.
- 43) R.A.Lula and W.G.Renshaw: *Met. Prog.*, **69** (1956), 73.
- 44) J.Botella, C.Merino and E.Otero: *Oxid. Met.*, **49** (1998), 297.
- 45) F.J.Perez, M.J.Cristobal, G.Arnau, M.P.Hierro and J.J.Saura: *Oxid. Met.*, **55** (2000), 105.
- 46) F.J.Perez, M.J.Cristobal, G.Arnau and M.P.Hierro: *Oxid. Met.*, **55** (2000), 165.
- 47) A.D.Schino, J.M.Kenny and M.Barteri: *J. Mater. Sci. Lett.*, **22** (2003), 691.
- 48) R.L.Tobler and D.Meyn: *Metall. Trans. A*, **19A** (1988), 1626.
- 49) Y.Tomota and S.Endo: *ISIJ Int.*, **30** (1990), 656.
- 50) R.E.Deret: *Met. Prog.*, **69** (1956), 54.
- 51) K.Hatsuta: *Yousetsukai*, **11** (1959), 403.
- 52) 滝沢浩一郎: 第119回腐食防食シンポジウム資料, 腐食防食協会, 東京, (1998), 30.
- 53) G.Rondelli, B.Vincentini and A.Cigada: *Mater. Corros.*, **46** (1995), 628.
- 54) H.H.Uhlig: Corrosion Handbook, (1948), 193.
- 55) ステンレス鋼便覧第3版, ステンレス協会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1995), 586.
- 56) K.Miyakusu, H.Hujimoto and T.Tanaka: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **60** (1989), 115.
- 57) H.Fujimoto, T.Ikawa and K.Miyakusu: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **74** (1996), 77.
- 58) 鈴木隆志: ステンレス鋼発明史, アグネ技術センター, 東京, (2000), 113.
- 59) R.A.Lula: High Manganese High Nitrogen Austenitic Steels, (1993), 229.
- 60) A.L.Schaeffer: *Weld. J.*, **26** (1947), 601s.
- 61) W.T.DeLong, G.A.Ostrom and E.R.Szumachowski: *Weld. J.*, **35** (1956), 521s.
- 62) T.Angel: *J. Iron Steel Inst.*, **177** (1954), 165.
- 63) H.Nohara, H.Ono and N.Ohashi: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 212.
- 64) F.B.Pickering, R.J.Irvine and D.T.Llewellyn: *J. Iron Steel Inst.*, **199** (1961), 153.
- 65) M.Tsuda: *Nippon Yakin Tech. Rep.*, **3** (1994), 49.
- 66) T.Segawa: *Resources Processing*, **51** (2004), 130.
- 67) 平成16年度 ステンレス鋼板用途別受注統計年報, ステンレス協会, (2005), 5.