

発電効率向上に役立つボイラ用鋼管

Boiler Pipes and Tubes for Higher Efficiency of Power Generation

三 村 裕 幸^{*(1)} 石 塚 哲 夫^{*(2)}
Hiroyuki MIMURA Tetsuo ISHITSUKA

抄 録

CO₂排出量抑制の点から火力発電プラントの発電効率向上が図られている。発電効率向上に役立つ新日本製鐵開発のボイラ用鋼管として、超々臨界圧発電プラントなどに用いられる大径厚肉鋼管用の高強度9Cr-1.8WNbV鋼管(NF616)と、ごみ焼却発電ボイラの高温化に伴い厳しくなる腐食に対応するために必要となる20~25%Crの高耐食オーステナイトステンレス鋼管を紹介した。

Abstract

The power generation efficiency of thermal power plants is being improved to reduce CO₂ emissions. As the boiler tubes and pipes Nippon Steel has developed for this purpose, here are introduced large-diameter and thick-walled pipes of high-creep strength 9Cr-1.8WNbV steel (NF616) for ultra-supercritical coal-fired power plants and tubes of highly corrosion-resistant 20-25%Cr austenitic stainless steel for refuse incineration boilers.

1. 緒 言

地球温暖化への影響が懸念されるCO₂の排出量を抑えることが発電分野においても重要な課題となり、火力発電やごみ発電の発電効率の向上が進められている。事業用火力高効率発電としては、長期的には石炭ガス化複合発電、加圧流動床複合発電が考えられているが、現時点ではLNG複合発電とともに石炭火力での超々臨界圧発電が有力である。また、ごみ焼却については、発電での利用が広がるとともに、高温高圧化による効率向上が意欲的に進められている。

本報では、発電効率の向上に役立つボイラ用鋼管として、超々臨界圧発電等の高温高圧火力発電プラントの大径厚肉鋼管用高強度フェライト系耐熱鋼管NF616と、ごみ焼却ボイラの高温化に伴い厳しくなる腐食に対応するための各種高耐食オーステナイトステンレス鋼管を紹介したい。

2. 高強度フェライト系耐熱鋼管NF616

2.1 背景

わが国の火力発電プラントの蒸気条件の高温化、高圧化が進められてきたが、それに伴い、管寄せ、主蒸気管などの大径厚肉鋼管の材料開発が重要となってきた。管寄せはボイラ炉内の小径管へ水蒸気を分配したり、炉内で加熱後に再収集するための大径管であり、主蒸気管は蒸気をボイラからタービンに導くための大径管である。いずれも高温高圧の蒸気が通ることから高い高温強度が必要とされる。

わが国の電力は原子力発電をベース電源とし、火力発電を需要の昼夜変動に応じて変動させる運用がなされている。負荷変動運転時の温度変化に伴う熱応力による破損の問題から、管寄せ、主蒸気管などの大径厚肉鋼管には熱膨張係数が小さく、熱伝導度が大きいフェライト系耐熱鋼が使用されるが、一般的にフェライト系耐熱鋼はクリープ強度が低かったために、その高強度化が課題であった。

米国で開発された9Cr-1MoNbV鋼(火STPA28)はそれまで使用されていた2¹/₄Cr-1Mo鋼(STPA24)などよりも優れた高温強度と工作性を有することから、全世界の高温高圧火力発電プラントに広く使われるようになった。しかしながら、最近の蒸気温度600℃以上の火力発電プラントでは、9Cr-1MoNbV鋼でも管厚が大きくなるため、さらに高強度の材料が必要となっている。

新日本製鐵が藤田東大名誉教授と共同で開発した9Cr-1.8WNbV鋼(NF616)¹⁾は、このようなニーズに合った材料である。ASME及びASTMでチューブ(T92)及びパイプ(P92)として規格化された。わが国でも、1997年6月に“発電用火力設備の技術基準”において、チューブ(火STBA29)、パイプ(火STPA29)及び鍛鋼品(火SFVAF29)として規格化され、実機に使用され始めている。

2.2 化学成分の特徴及び物理的特性

表1にNF616の化学成分の規格範囲及び例を他鋼と比較して示す。NF616はWを1.8%添加してクリープ強度を高めている点の特徴である。Nb、Vの析出強化を利用している点は9Cr-1MoNbV鋼と同じである。NF616は比較的遅い冷却速度でもデルタフェライトが析出せず焼き戻しマルテンサイト一相となるため靱性が必要な厚

*⁽¹⁾ 鋼管営業部 マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-7907

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

表1 火STPA29(NF616)と他鋼の化学成分の比較

(mass%)

規格	元素	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Nb	N	B
STPA24 (2 ¹ / ₄ Cr-1Mo)	規格 範囲	≤0.15	≤0.50	0.30~ 0.60	1.90~ 2.60	-	0.87~ 1.13	-	-	-	-
火STPA28 (9Cr-1MoNbV)	規格 範囲	0.08~ 0.12	0.20~ 0.50	0.30~ 0.60	8.00~ 9.50	-	0.85~ 1.05	0.18~ 0.25	0.06~ 0.10	0.030~ 0.070	-
火STPA29 (NF616)	規格 範囲	0.07~ 0.13	≤0.50	0.30~ 0.60	8.50~ 9.50	1.50~ 2.00	0.30~ 0.60	0.15~ 0.25	0.04~ 0.09	0.030~ 0.070	0.001~ 0.006
	例	0.10	0.23	0.50	9.09	1.83	0.43	0.20	0.064	0.046	0.0012

肉部材に適している。

図1に各鋼種の熱膨張率を比較して示す。NF616は9Cr-1MoNbV鋼とほぼ同じ熱膨張率を有し、オーステナイトステンレス鋼(TP316)の約2/3である。NF616の熱伝導率、ヤング率などの物理的特性も9Cr-1MoNbV鋼と同等である¹⁾。

2.3 高温強度及び許容引張応力

図2にNF616パイプ、鍛鋼品のクリープ破断強度を9Cr-1MoNbV鋼の平均クリープ強度曲線と比較して示す。短時間側では両鋼には大きな差はないが、長時間側ではNF616の方が長寿命となっている。

高温引張、クリープ破断、クリープひずみのデータを基に設定された火STPA29(NF616)の許容引張応力を他鋼と比較して図3に示す。Cr-Mo(W)鋼の高温強度は、2¹/₄Cr-1Mo鋼とCr量が増えただけの9Cr-1Mo鋼ではほとんど変わらないが、Nb, Vを添加した9Cr-1MoNbV鋼で大幅に上昇し、Wを添加した9Cr-1.8WNbV鋼(NF616)でさらに上昇することがわかる。NF616の許容引張応力

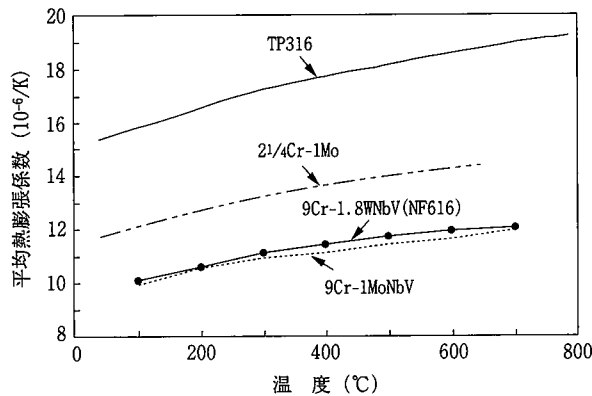


図1 各鋼種の熱膨張率の比較

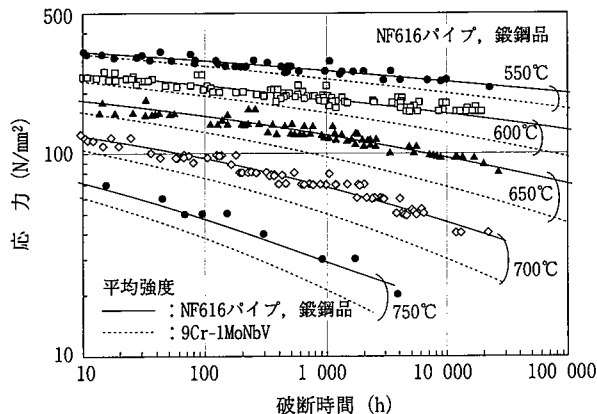


図2 NF616パイプ、鍛鋼品と9Cr-1MoNbV鋼のクリープ破断強度の比較

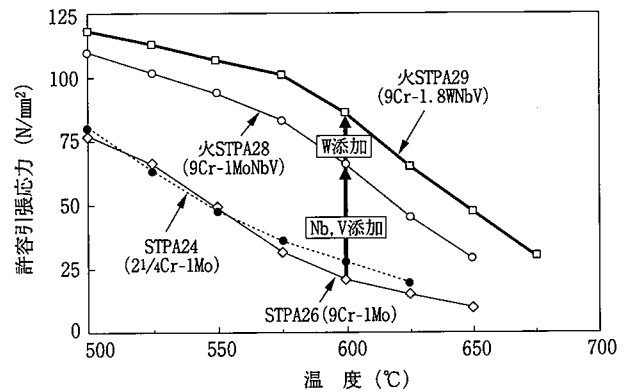


図3 各鋼種の許容引張応力の比較

は、9Cr-1MoNbV鋼よりも600°Cで約30%、625°Cで約44%高い。

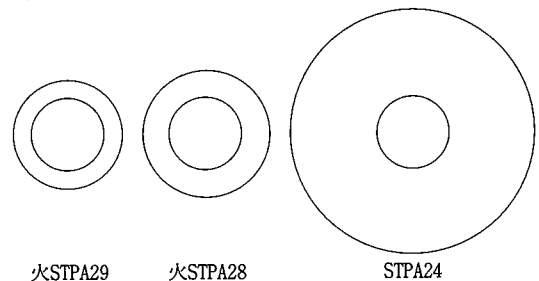
2.4 高強度フェライト鋼採用のメリット

火STPA29のような高強度フェライト鋼を採用するメリットは大径鋼管の肉厚の減少にある。内径420mmの管寄せの肉厚をJIS B 8201に則り計算した例を表2に示す。最小肉厚は火STPA28では151mmとなるのに対し、火STPA29では104mmとなり、肉厚で約30%、重量で約36%の減少となる。なお、STPA24では最小肉厚は490mm、外径は1400mm、重量は火STPA28の5.17倍となり、非現実的な鋼管となる。逆に言えば、9%Cr鋼がなければ高温の火力発電プラントは成立しないことを示している。1000MW級の石炭焚きボイラでは、管寄せ及び主蒸気管に火STPA28を500トン以上使用される場合があり、火STPA29に置き換えることで重量を200トン以上低減することができる。

表2 管寄せの最小肉厚の計算例

材料	火STPA29	火STPA28	STPA24
最小肉厚 t_{min} (mm)	104	151	490
外径 D_o (mm)	628	722	1400
重量比	0.63	1.00	5.17

計算条件：メタル温度=615°C、最高使用圧力=25MPa、内径=420mm、管穴のある部分の効率=0.8



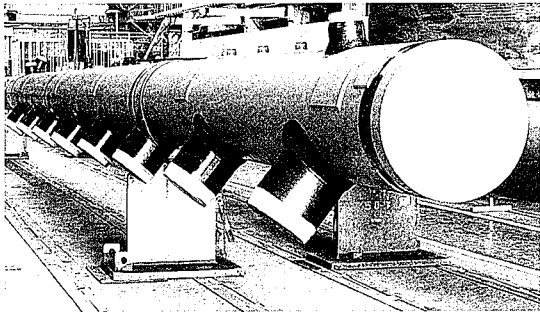


写真1 1000MW級石炭焚ボイラ用のNF616の管寄せ
(提供：バブコック日立)

このように高強度フェライト鋼を採用し、薄肉化することにより、肉厚に比例する荷重変動時の熱応力が低減できるほか、材料、溶接施工、輸送等のコスト低減、ボイラ建屋重量低減など多くのメリットがあると考えられる。

2.5 実機プラントへの適用

本鋼のような高強度耐熱鋼を実機プラントに使用するには、高強度の溶接材料の開発が不可欠であり、共金系のTIG, SMAW, SAW用溶接材料の開発、商品化を完了している²⁾。また、ティー、フランジなどの鍛鋼品の周辺部品も開発され、パイプと同様な高温強度特性が得られることが確認されている。既に、蒸気温度600℃/610℃の事業用石炭焚発電ボイラ2基への採用が決まり、管寄せ等を納入した。溶接等工作に問題なく製造されている。写真1は製造されたNF616の管寄せである。

3. ごみ焼却発電用オーステナイトステンレス鋼鋼管

3.1 背景

ごみのリサイクルは現代における重要な課題である。ごみを分別し再製品化することが望ましいが、それが困難な場合、ごみを焼却した廃熱を熱あるいは電気の形で利用することも一種のリサイクルと考えられる。蒸気タービンを設置し自家発電を行っているごみ焼却場は1995年6月時点で181箇所あり、今後増加する傾向にある。

わが国のごみ発電で採用されてきた蒸気条件は従来300℃×3MPa以下と、火力発電ボイラに比べて低温低圧であり、発電効率は10～15%と低かった。これはごみ焼却炉内の腐食環境が厳しく、蒸気温度が300℃を超えると伝熱管の腐食問題が顕著となるためである。しかし、電力会社への売電が可能となったこともあって発電効率の向上が図られるようになり、最近、わが国でも蒸気温度が300℃を越え、発電効率が20%以上となるごみ焼却プラントが建設されている。

従来の蒸気温度300℃以下のごみ焼却ボイラでは、腐食が厳しくないために炭素鋼鋼管で十分であるが、300℃超の蒸気温度のごみ焼却ボイラでは、過熱器管等の高温部にはオーステナイトステンレス鋼あるいはNi合金の鋼管が必要となる。現在のところ、蒸気温度400℃までは310系(25Cr-20Ni)、309系(23Cr-12Ni)のステンレス鋼管が過熱器管に選定される傾向にある。規格鋼以外に、他用途向けに開発された独自開発鋼種が適用されている場合も多い。高効率ごみ発電を実現させるためには、ボイラ設計上の工夫により腐食環境をよりマイルドにすることに加えて、環境に応じた適切な耐食材料の選定が重要である。

3.2 ごみ焼却炉の腐食環境

ごみ焼却炉の環境はごみ質、炉種、設置場所、操業条件などによって異なり、一概に述べることはできないが、化石燃料の場合と大きく異なる点は、ごみに含まれる塩化ビニール樹脂や食品中の塩類を発生源として、雰囲気ガスや伝熱管に付着する燃焼灰にCl分が比較的高濃度で含まれることである。Clは雰囲気ガス中ではHClガスとして1000ppm前後存在し、付着灰中では主にアルカリ金属塩化物として存在する。また、SO_xは100ppm以下と低めであることが多いが、付着灰中には必ず硫酸塩も含まれる。塩化物や硫酸塩は低融点の共晶化合物を形成し、温度が融点以上に達すると熔融塩腐食により伝熱管の腐食を極めて加速する。ごみ中のプラスチックやタイヤなどに含まれるPbやZnなどの重金属の塩化物は、熔融塩の融点を下げるために加速腐食の発生開始温度を低下させる³⁾。

3.3 耐食性に及ぼす合金元素の効果

ごみ焼却環境での合金の耐食性は、大まかにはCr+Ni量が多いほど良好と整理されるが、細かく見ると、耐食性に及ぼす合金元素の効果は硫酸塩環境と塩化物環境とは異なる。

熔融硫酸塩腐食は石炭焚ボイラやガスタービンでしばしば経験され、数多くの研究結果が報告されている。一般的には高Cr鋼の耐食性が高いが、Niは有効でなく、Mo添加は有害とされる⁴⁾。また、SiはCr₂₃C₆の粒界への析出を助長して有効Cr量を減少させ、粒界腐食を促進させるため有害となる場合がある⁴⁾。

一方、塩化物が主となる環境で各種材料を腐食試験した結果では、Ni, Moを多く含む合金ほど高耐食性を示し、また20%以上のCrを含む合金間ではCrによる耐食性の差は顕著にはみられなかった。

実際の灰が塩化物が主なのか硫酸塩が主なのかは、焼却炉ごと、また炉内での位置によっても異なるため一概には言えないが、材料の選定は腐食が厳しい塩化物主体の環境での耐食性を考慮して行う場合の方が多いようである。

3.4 各種合金の腐食試験結果

表3に腐食試験を行った規格鋼及び新日本製鐵開発鋼の化学成分を示す。また、図4及び図5に塩化物主体の環境及び塩化物硫酸塩混合環境における実験室腐食試験結果を示す。腐食減量から換算した全面腐食深さ及び試験片の断面ミクロ組織観察で得られた最大粒界腐食深さを図示している。写真2は塩化物主体の実験室腐食試験後の試験片の断面のミクロ観察結果である。

塩化物主体の環境では、腐食量はSUS304と309系が同等で一番多く、次いで、310系と高Si系が同等で少な目で、高Ni系が一番少なかった。一方、塩化物硫酸塩混合環境においては、309系のYUS170が310系と同等の耐食性を有するなどやや異なった耐食性の順となっている。

新日本製鐵開発材を以下簡単に紹介する。

YUS170は耐海水性鋼として開発されるとともにソーダ回収ボイラでも実績を持つ鋼種である。塩化物硫酸塩混合環境で比較的良好な耐食性を示す。

NF709は超々臨界圧ボイラ用に開発された高強度鋼で、310系の中では塩化物環境に有利なNi, Moの含有量が高く、塩化物主体の環境での実験室腐食試験ではSUS310と比較して耐粒界腐食性の面で優れていた。NF709をさらに低C高Cr化したNF709R(0.03C-22Cr-25Ni-Mo)も製造している。YUS170及びNF709/NF709Rは火力設備技術基準で規格化が完了しており、使用できる状況にあ

表3 ごみ焼却環境腐食試験に用いた合金の化学成分

(mass%)

材料名	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Nb	その他	備考	
304	SUS304	0.05	0.5	1.2	8.64	18.4	—	—		
309系	YUS170*	0.02	0.4	1.1	13.6	24.0	0.8	—	N	火SUS309J1TB
310系	SUS310	0.04	1.0	1.8	19.9	24.4	—	—		
	NF709*	0.07	0.5	1.0	25.4	20.2	1.5	0.3	N, Ti, B	火SUS310J2TB
高Si系	YUS701*	0.11	2.0	1.4	12.2	23.7	0.6	—	N	
	NF707*	0.07	0.6	0.6	35.5	25.4	1.5	0.3	N, Ti, B	
高Ni系	Alloy 825	0.03	0.2	0.4	40.4	22.8	2.7	—	Cu, Ti	
	Alloy 625	0.02	0.1	0.1	60.4	22.5	8.7	3.5	Ti, Fe	

*：新日本製鐵開発材

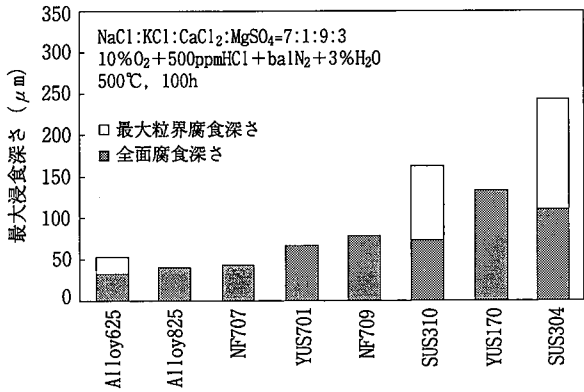


図4 塩化物主体の環境における各種材料の耐食性比較 (500°C)

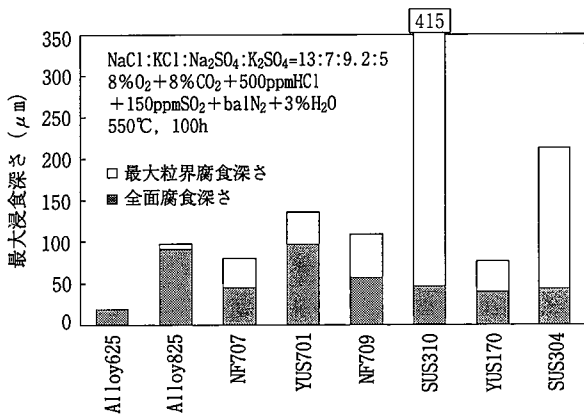


図5 塩化物硫酸塩混合環境における各種材料の耐食性比較 (550°C)

る。特に、NF709Rは適用例が増えている。

YUS701はラジアントチューブなどの高温用途で開発された鋼種で、2~3%Siの添加が特徴である。ベースが309系であるにもかかわらず、塩化物主体の環境の腐食試験でNF709と同等の耐食性を示した。

NF707はNF709をさらに高Cr高Ni化した鋼種である。塩化物主体、及び塩化物硫酸塩混合のいずれの環境においても良好な耐食性を示した。

図6は材料選定のために実炉においてNF709R(火SUS310J2TB)とSUS310TBを比較した結果である。実炉に挿入した鋼管の内面を空気で冷却してメタル温度を制御して試験を行った。約2000時間の試験においてNF709Rの方が減肉量は少なかった。この結果を基に、新規ごみ焼却発電ボイラの過熱器管としてNF709Rが選定された。

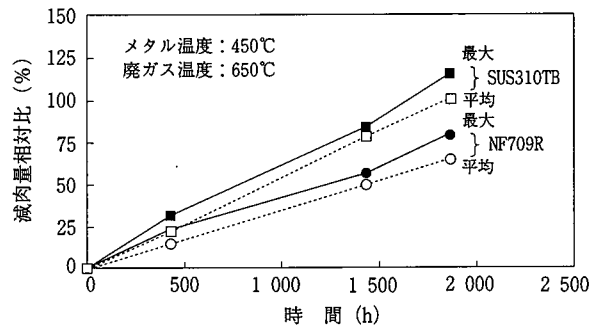


図6 実炉腐食試験での腐食量の相対比較 (SUS310TBの1872h後の平均腐食量=100%)

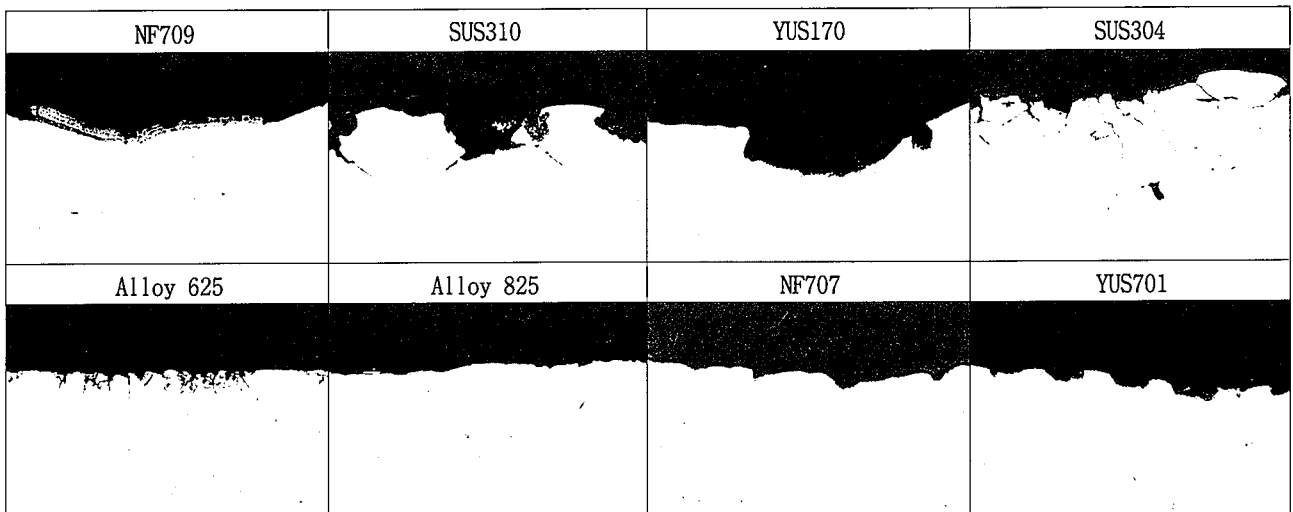


写真2 塩化物主体の環境での腐食試験後の試験片断面 (550°C, 100h)

100 μm

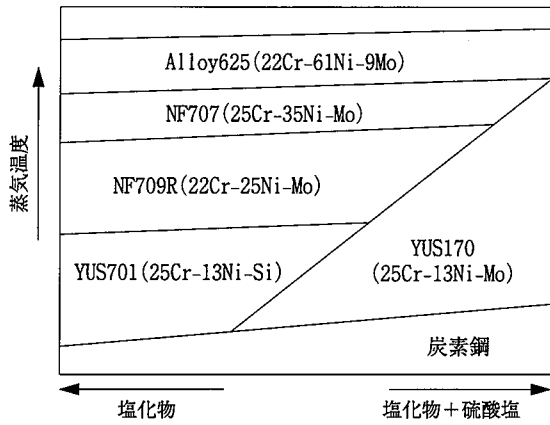


図7 経済性を考慮したごみ焼却炉用鋼管選択イメージ

3.5 環境による材料選定

図7は上記試験を含む種々の試験の結果を基に、経済性を考慮して決定した、腐食環境及び温度による材料選定のイメージである。低温では炭素鋼で十分である。塩化物主体の環境では、温度が上昇するにつれ、20~25%CrでNi量を増やした鋼種が必要となる。ただし、硫酸塩が加わるとNi量が少な目でCr量が多い309系が有効な場合がある。

4. 結 言

発電効率向上に役立つボイラ用鋼管を紹介した。これらの鋼管がCO₂排出量削減に貢献することを願っている。

参考文献

- 1) Mimura, H. et al. : CSPE-JSME-ASME-International Conference on Power Engineering, Shanghai, 1995, p.1070
- 2) Morimoto, H. et al. : ibid, p.1076
- 3) 石塚哲夫 ほか：耐熱金属材料123委員会研究報告書. 34(3), 401(1993)
- 4) 荒木敏 ほか：製鉄研究. (340), 28(1991)
- 5) 石塚哲夫：溶接学会誌. 66(2), 38(1997)