

火力発電所における環境対策とステンレスの利用

増山 不二光

1. はじめに

我が国の火力発電所は昭和30年頃から急増し、電源構成の主流となっている。そして、現在に至るまで、大容量化による発電原価の低減と高温・高圧化による発電効率の向上に大きな努力がはらわれ、結果的にCO₂などの排出削減を進めてきた。一方で、石油や石炭などの化石燃料の燃焼によって生じる排ガスや燃焼灰、さらには発電所内で使用する水などの直接的浄化や処理による環境汚染物質の排出削減にも種々の取り組みがなされてきた。エネルギー生産における省資源・省エネルギーと地球環境対策は世界的な重要課題であり、環境保全のために上記のような努力や取り組みを今後も継続して実施していかなければならない。特に発電設備や環境設備の性能と信頼性を高めるためには苛酷な条件で使用できる材料が不可欠であり、そのためにステンレスの使用範囲が大きくなり、また、その改良・開発も必要とされる。以下には火力発電所における高温機器の高温・高圧化と環境装置のますます厳しくなる腐食に耐えるステンレスの利用状況について述べる。

2. 火力発電所における環境対策

1993年に施行された環境基本法や1997年のCOP3でのCO₂削減目標設定など、国内のCO₂の約30%を排出している火力発電所に対する環境規制は厳しくなっている。これに対して火力発電所として取り得る対策は発電効率を向上させて結果的に燃料の使用量を低減させ、排出するCO₂や環境汚染物質の量を少なくすることと排ガス浄化や

燃焼灰処理によって直接的に規制物質の排出量を少なくすることである。前者の高効率化の技術はそのまま環境対策につながるものであるが、最も効果的な手段は化石燃料の中でも、CO₂や灰分の少ないクリーンな燃料、すなわち天然ガスを使用することである。すなわち、同じ発電量に対し天然ガスの炭素量は石炭の約70%、石油の約90%である。従って、最近では天然ガスを燃料にし、さらに蒸気タービンとガスタービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電が注目され、多く建設されるようになった。その効率はガスタービン入口温度が1300℃で47%、そして1500℃では50%になる。しかし、この場合、ガスタービンにはNi基超合金などが使用されるが、蒸気タービンの系統の排熱回収ボイラの蒸気温度は最高でも570℃程度であり、低合金鋼や9%Cr鋼で十分に対応できるためにステンレスの使用を必要としない。

発電の高効率化はガスタービンコンバインドサイクル発電だけでなく種々の発電システムで研究されている。特に石炭は天然ガスや石油に比べて、炭素分が多く、CO₂の発生量の面から不利であるが、埋蔵量が豊富であり、将来に亘っての重要なエネルギー資源であるために、クリーン化と高効率化について多方面から研究開発が進められている。中でも石炭ガス化コンバインドサイクル (IGCC) 発電と加圧流動床燃焼 (PFBC) コンバインドサイクル発電は2000年以降の有力な発電システムとして注目され、50%近い発電効率が期待されている。しかし、この場合もステンレスの利用という面からは対象

範囲は広くなく、IGCCやPFBCの燃焼炉内の過熱器などの機器の一部に限られる。

以上に述べた新しい発電システムの採用による高効率化に対し、従来火力発電システムの延長上にある超々臨界圧発電では、その高効率化のために炉内の機器および蒸気配管が直接高温・高圧化するために材料面から種々の取り組みがなされてきており、1980年代以降ステンレスの開発と利用に関して大きな進展と変化があった¹⁾。超々臨界圧発電では燃料として天然ガスあるいは石炭を使用し、発電効率も従来40%未満であったものが、約45%にまで上昇してきており、現在、建設あるいは計画されている火力発電所の主流となっている。後述するステンレスの利用については主としてこの超々臨界圧発電の効率向上の面から述べることにする。

一方、排ガス、排水、燃焼灰などの廃棄物処理系において直接的に規制物質の排出量を少なくするための環境技術についても多くの研究開発がなされている。図1²⁾は火力発電所における環境設備を示す。その範囲は(1)排煙ガス処理(CO₂分離装置、排煙脱硝・脱硫装置)、(2)水処理(復水浄化系、補給水処理装置、排水処理装置)、(3)固体廃棄物処理(海生物処理装置、廃棄電線油化装置)に分けられる²⁾。これらの装置には種々の材料が用いられているが、主として問題となる損傷は低温での腐食である。従って、ステンレスも耐食性を考慮して一部に使用されているが、通常の装置と異なった特殊な材料は使用されていない。しかし、火力発電所特有の腐食として脱硫装置などでのス

テンレスの硫酸腐食や隙間腐食が経験されている。

3. 効率向上のためのステンレス利用

超々臨界圧発電は従来の蒸気条件の主流である超臨界圧、すなわち、24 MPa（過熱器出口温度538℃）を超える蒸気圧力で運転されるもので、正確には主蒸気圧力が24MPa以上、主蒸気および再熱蒸気の温度が565℃以上のタービン入口蒸気条件と言える¹⁾。そして、この蒸気条件に対して耐熱性（高温強度と耐酸化・耐食性）の面からステンレスを使用せざるを得ないが、その使用箇所はボイラ炉内の過熱器、再熱器であり条件によっては蒸気配管やタービンロータもその対象となる。しかし、最も多く使用されるのはボイラであるので、図2.³⁾にボイラの側面図の例を示す。過熱器、再熱器においてメタル温度が約580℃以下の範囲には炭素鋼や低合金鋼が、また580℃を超える範囲にはステンレスが使用される。これらは外径約50mm、厚さ約10mmの小径管であり、要求される特性は次の通りである³⁾。すなわち、

- (1)設計温度・圧力条件および耐久寿命に対して十分な引張強さおよび降伏強さを有し、かつ十分なクリープ強さおよびクリープ破断強さを持つ
- (2)炉内燃焼ガスによる酸化、腐食あるいは摩耗などに耐える
- (3)熱間、冷間における曲げ、押広げ、締め、絞りおよびその他の加工性が良い
- (4)同種および異種金属材料との溶接性が良い
- (5)熱膨張、熱伝導および弾性係数などについて適当な物理的性質を持つ
- (6)以上の諸性質に応じて価格が安い

ステンレスは12%Cr系のフェライト（マルテンサイト）鋼を含め、Cr含有量が多いために特に耐酸化・耐食性の面から低合金鋼に比べて有利である。しかし、高価なことが最大の難点であり、過熱器や再熱器においてはメタル

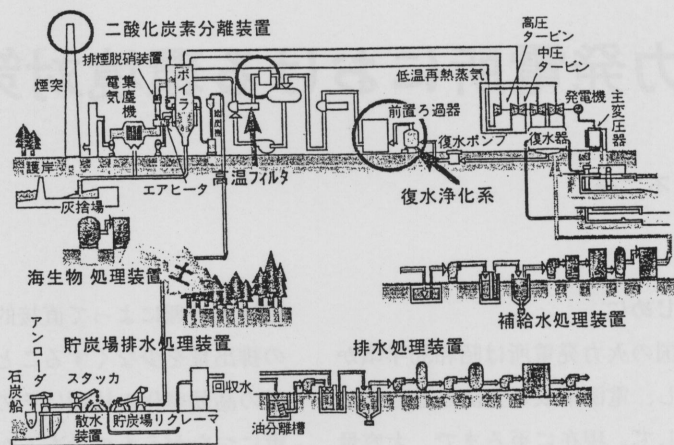
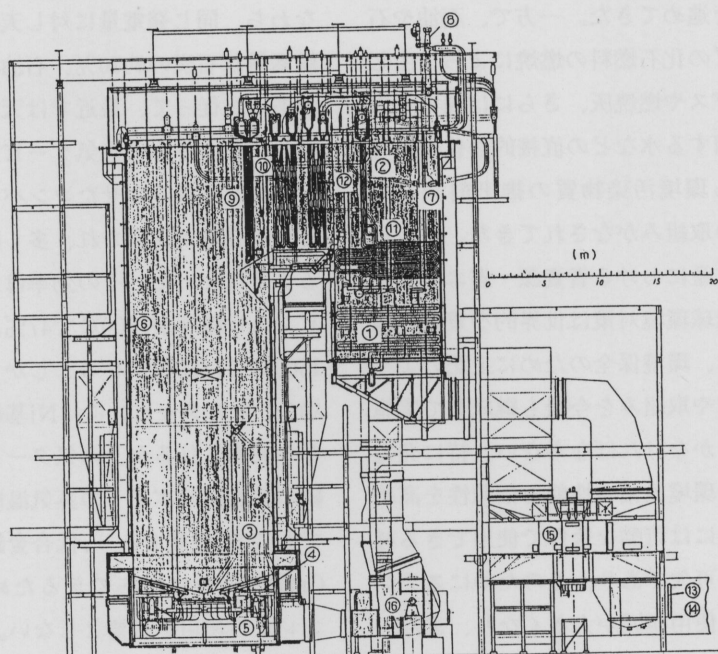


図1. 火力発電所の環境設備



- | | | | |
|------------|-------------|---------|------------|
| ① 節炭器 | ⑤ 分配球 | ⑨ 1次過熱器 | ⑬ 押込通風機 |
| ② 混合球 | ⑥ 炉内周壁 | ⑩ 2次過熱器 | ⑭ 蒸気式空気予熱器 |
| ③ ボイラ循環ポンプ | ⑦ ウォータセパレータ | ⑪ 低温再熱器 | ⑮ 空気予熱器 |
| ④ 炉内分割壁 | ⑧ ボイラ絞り弁 | ⑫ 高温再熱器 | ⑯ ガス再循環通風機 |

図2. ボイラ全体側面図（1000MW超臨界圧ボイラ）

温度をできるだけ下げないように設計面から考慮がはられている。それでも前述の超々臨界圧発電では高温・高圧条件の部分が多くなり、ステンレスを使用する範囲が広がる。しかし効率向上によってコストの上昇を補完でき、燃料使用量の大幅な低減が可能となるので、新たに開発された材料も含め、高性能のステンレスが多量に使用される。

表1.¹⁾に最近開発された材料も含

めて9%Cr以上のボイラ用鋼管の化学成分を示す。9%Cr系はステンレスとは呼べないが、最近、9～12%Cr系の材料で従来のオーステナイトステンレスと同等以上の高温強度を有するものが出現している。12%Cr系では、HCM12⁴⁾とHCM12A⁵⁾が新しい12%Cr系ステンレスとして挙げられる。HCM12は溶接性と高温強度が著しく改善されたδ-フェライトと焼戻しマ

表1. ボイラ用鋼管材の公称化学成分

		(mass %)											
材 料 (規格)		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Ti	B	その他
9%Cr系鋼	HCM9M (火STBA27)	0.07	0.3	0.45	—	9.0	2.0	—	—	—	—	—	—
	T91 (火STBA28)	0.10	0.4	0.45	—	9.0	1.0	—	0.20	0.08	—	—	0.05N
	NF616 (火STBA29)	0.07	0.06	0.45	—	9.0	0.5	1.8	0.20	0.05	—	0.004	0.06N
12%Cr系鋼	HCM12 (火SUS410J2TB)	0.10	0.3	0.55	—	12.0	1.0	1.0	0.25	0.05	—	—	0.03N
	HCM12A (火SUS410J3TB)	0.11	0.1	0.60	—	12.0	0.4	2.0	0.20	0.05	—	0.003	1.0Cu, 0.06N
	SUS304HTB	0.08	0.6	1.6	8.0	18.0	—	—	—	—	—	—	—
18%Cr-8%Ni系鋼	Super 304H (火SUS304J1HTB)	0.10	0.2	0.8	9.0	18.0	—	—	—	0.40	—	—	3.0Cu, 0.10N
	SUS321HTB	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	—	—	—	—	0.5	—	—
	Tempaloy A-1 (火SUS321J1HTB)	0.12	0.6	1.6	10.0	18.0	—	—	—	0.10	0.08	—	—
	SUS316HTB	0.08	0.6	1.6	12.0	16.0	2.5	—	—	—	—	—	—
	SUSTP347HTB	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	—	—	—	0.8	—	—	—
	ASME TP347 H (火SUSTP347HTB)	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	—	—	—	0.8	—	—	—
	ASME TP347 HFG	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	—	—	—	0.8	—	—	—
15%Cr-15%Ni系鋼	17-14CuMo	0.12	0.5	0.7	14.0	16.0	2.0	—	—	0.4	0.3	0.006	3.0Cu
	Esshete 1250	0.12	0.5	6.0	10.0	15.0	1.0	0.2	1.0	—	0.06	—	—
	SUS310TB	0.08	0.6	1.6	20.0	25.0	—	—	—	—	—	—	—
20-25%Cr系鋼	HR3C (火SUS310J1TB)	0.06	0.4	1.2	20.0	25.0	—	—	—	0.45	—	—	0.2N
	Alloy 800H (NCF800HTB)	0.08	0.5	1.2	32.0	21.0	—	—	—	—	0.5	—	0.4A ϕ
	Tempaloy A-3 (火SUS309J4HTB)	0.05	0.4	1.5	15.0	22.0	—	—	—	0.7	—	0.002	0.15N
	NF709 (火SUS310J2TB)	0.15	0.5	1.0	25.0	20.0	1.5	—	—	0.2	0.1	—	—
高Cr-高Ni鋼	CR30A	0.06	0.3	0.2	50.0	30.0	2.0	—	—	—	0.2	—	0.03Zr
	HR6W	0.08	0.4	1.2	43.0	23.0	—	6.0	—	0.18	0.08	0.003	—

ルテンサイトからなる二相組織の材料で、微細なVNによる析出強化と800℃以上の高温焼戻し処理によってクリープ強度が安定化されている。この材料はすでに15年以上の使用実績を有しており、その良好な耐食性を生かして高温腐食の激しいソーダ回収ボイラの過熱器管に多量に使用されている。

HCM12AはHCM12の改良材であり、 δ -フェライトの生成を防止し、靱性を向上させ大径管として使用できるように材料設計されている。実用材料の開発のためには単にクリープ強度を向上させるだけではなく、耐酸化性、溶接性、靱性なども考慮に入れなければならないが、HCM12Aでは12%Cr系鋼をベースとして他の特性を損なわないようにクリープ強度向上を図っている。クリープ強度向上は基本的にはV、Nb、N添加による析出強化とW、Moによる固溶強化で達成されているが、長時間強度を安定化させるためにNiをできるだけ少なくし、また、 A_{c1} 変態点を高めにして高温焼戻しが可能になるようにしている。すなわち、12%Cr系鋼ではCr当量が高くなると靱性確保

に有害な δ -フェライトが生成するので、これを極力抑制するためにオーステナイト安定化元素であるNi、C、Nの添加を必要とするが、HCM12Aでは長時間強度を低下させ、 A_{c1} 変態点を大きく低下させるNiの代わりにCuを添加している。

オーステナイト系の中で18%Cr-8%Ni系鋼については高温での使用を考慮して、品質の安定化を図り、耐食性を向上させるために種々の改良がなされている。また、Cr量を20%以上に増した上で高温強度を向上させた新しい材料も開発されている。

SUS304HTB、SUS321HTB、SUS316HTBおよびSUS347HTBなどの18%Cr-8%Ni系鋼は従来の蒸気条件の火力発電プラントに依然として使用されているが、許容応力が上記4鋼種よりも高く設定されたASME規格材TP347Hを、水蒸気酸化対策の面からSUS347HTBと同様にASTM粒度番号8以上の細粒とした上で強度を高めた材料がTP347HFG⁶⁾であり、ASMEに規格化されている。この材料は過熱器管の信頼性向上の面から極めて有利な材

料であるために、超々臨界圧発電プラントの多くに使用されている。

図3.¹⁾に18%Cr-8%Ni系鋼と15%Cr-15%Ni系鋼の許容応力を比較して示す。この中で15%Cr-15%Ni系鋼の17-14CuMo⁷⁾とEsshete 1250⁸⁾は完全オーステナイト鋼であるために高強度が得られやすく、許容応力が高いが、Cr量が少ないために耐食性が劣る欠点がある。この図から18%Cr-8%Ni系鋼の中ではSuper304H⁹⁾の許容応力が格段に高く、約670℃まではこれまで最高の強度を有するとされていた17-14CuMoの強度をも上回っている。また、Tempaloy A-1¹⁰⁾も既存の規格材よりも高い許容応力を有している。Super304HとTempaloy A-1はともにSUS304HTBをベースに開発されたものであるために経済性も優れており、さらに細粒鋼であるために耐水蒸気酸化の面からも有利な材料である。

20~25%Cr系オーステナイト鋼やCR30A¹¹⁾およびHR6W¹²⁾のような高Cr-高Ni鋼は他の鋼種に比較して著しく優れた耐高温腐食性および耐水蒸気酸化性を有しているが、許容応力に比

較して高価であるのが欠点である。しかし、表1.に示したように最近開発された材料、特に20～25%Cr系オーステナイト鋼は優れた高温強度を有している上に比較的低コストであり、耐高温腐食性を考慮した高強度鋼として実用化されている。20～25%Cr系オーステナイト鋼およびCR30Aの許容応力を比較して図4.¹⁾に示す。HR3C¹³⁾、NF709¹⁴⁾、Tempaloy A-3¹⁵⁾の許容応

力はNCF800HTBよりも著しく高く、より高い蒸気条件および種々の腐食環境下で使用できる。NCF800HTBは多量のNiを添加することによって組織を安定化したものであるが、価格に対して高温強度は十分ではない。以上に述べた、最近開発され、規格化されたボイラ用鋼管材をもとに、その過熱器・再熱器管としての使用区分を示したのが図5.¹⁶⁾である。これから、現在

では過熱器・再熱器管に対しては650℃クラスの蒸気条件を実現させるのに十分な材料が開発されている。

過熱器管・再熱器管のような小径管に対し、管寄せや蒸気配管は外径が約500mm、肉厚が約100mmの大径厚肉鋼管である。従って、小径管とは少し違った材料特性が要求されることもあるが、基本的には高温強度と耐酸化・耐食性が重要であり、小径管と同様である。そこで、小径管と同じ組成の大径管が使用されるが、炉外での使用になるので、蒸気温度以上にメタル温度が上昇することはない。従って、過熱器の出口管寄せおよび主蒸気管についてみると蒸気温度593℃までは9%Cr鋼が使用できる。しかし、高温になるほど、肉厚が大きくなるために発停にともなう熱応力が大きくなり、また、工作性の面からも好ましくない。そこで、最近600℃付近の蒸気温度に対しては、より強度が高く耐酸化性に優れた12%Cr系のHCM12Aが使用されるようになった。しかし、その使用限界温度も約630℃と考えられ、650℃に近い蒸気条件となれば、オーステナイト系のSUS316HTPを使用せざるを得ない。図6.¹⁶⁾は管寄せ、蒸気管用材料の蒸気温度に対する使用区分を示している。

蒸気条件およびメタル温度の上昇で最も問題になるのは、上に述べたように、いかに高強度の材料を使用するかであり、その点で超々臨界圧発電ではステンレスが多く使用され、コストを上げないで高強度化しようとする材料開発が多くなされた。この他に、高温化で問題となるのが高温腐食と水蒸気酸化である。この両者は材料中のCr量と大きな関係があり、特に溶融石炭灰中での高温腐食は図7.¹⁷⁾に示すようにCr量が増すに従い、腐食減量が小さくなり、特に20%以上のCrを含む材料では耐食性が著しく向上する。従って、最近開発された20～25%Crオーステナイトステンレスは従来の18Cr-8Ni

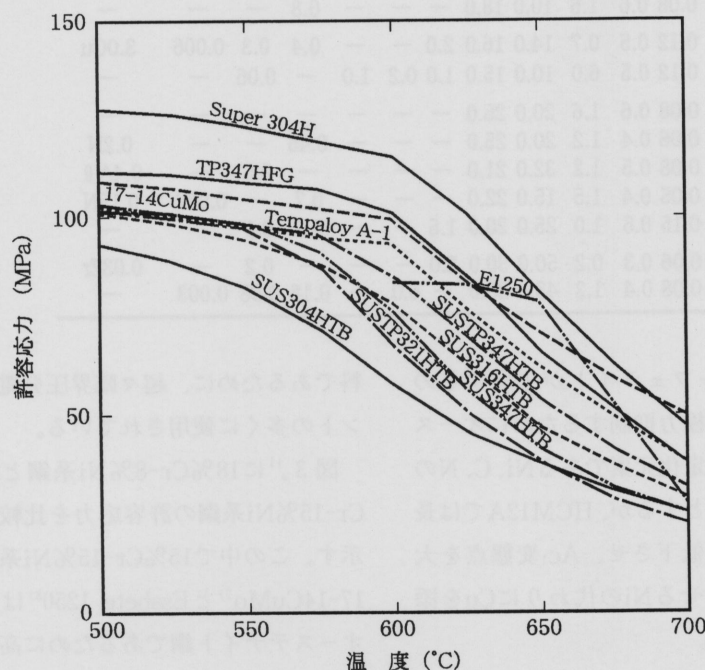


図3. 18%Cr-8%Ni系および15%Cr-15%系オーステナイト鋼の許容応力の比較

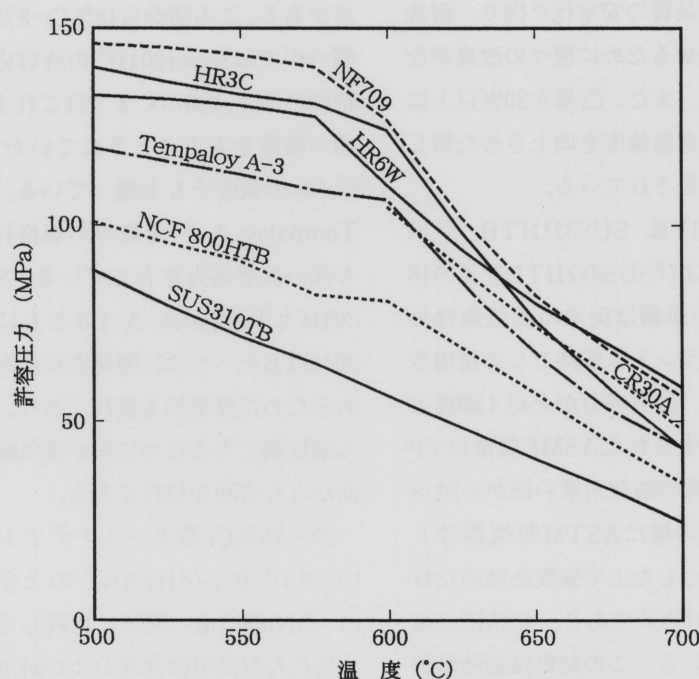


図4. 20～25%Cr系および高Cr-高Ni系オーステナイト鋼の許容応力の比較

蒸気温度 (°C)		538	566	593	621	649
過熱器	SUS347HTB	△	△			
	火SUS304J1HTB	△	△			
	火SUS321J1HTB	△	△			
	ASME TP347HFG	△	△			
	火SUS309J4HTB		△	△	△	△
	火SUS310J1TB		△	△	△	△
	火SUS310J2TB		△	△	△	△
再熱器	火STBA28	△	△			
	SUS347HTB	△	△			
	火SUS304J1HTB	△	△			
	火SUS321J1HTB	△	△			
	ASME TP347HFG	△	△			
	火SUS309J4HTB		△	△	△	△
	火SUS310J1TB		△	△	△	△

図5. 過熱器・再熱器管用材料の蒸気温度に対する使用区分

主蒸気および再熱蒸気温度 (°C)		538	566	593	621	649
最終過熱器 出口管寄せ および 主蒸気管	STPA24	△	△			
	ASME P91 (火STPA28)	△	△			
	ASME P92 (火STPA29)		△	△	△	△
	ASME P122 (火SUS410J3TP)		△	△	△	△
	SUS316HTP				△	△
最終再熱器 出口管寄せ および 高温再熱 蒸気管	STPA24	△	△			
	ASME P91 (火STPA28)	△	△			
	ASME P92 (火STPA29)		△	△	△	△
	ASME P122 (火SUS410J3TP)		△	△	△	△
	SUS316HTP				△	△

図6. 管寄せ・蒸気管用材料の蒸気温度に対する使用区分

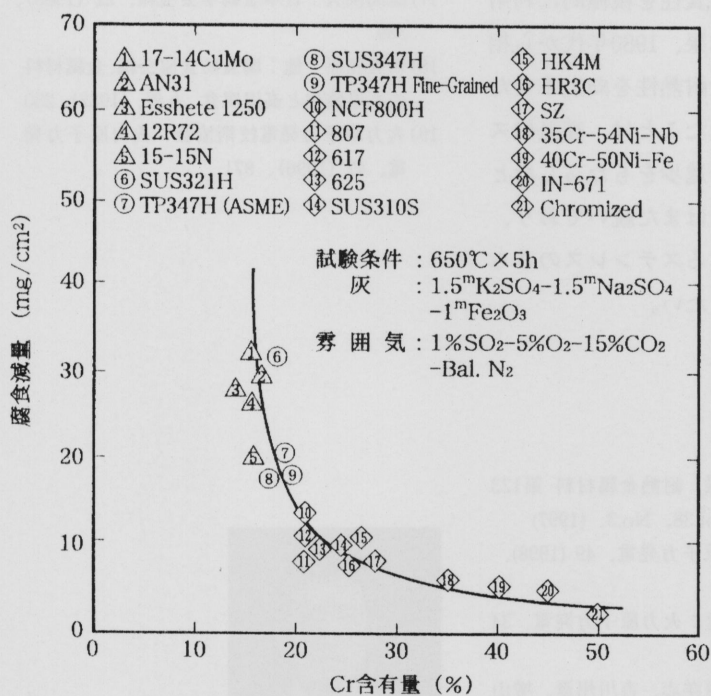


図7. 合金中のCr含有量と高温腐食減量との関係

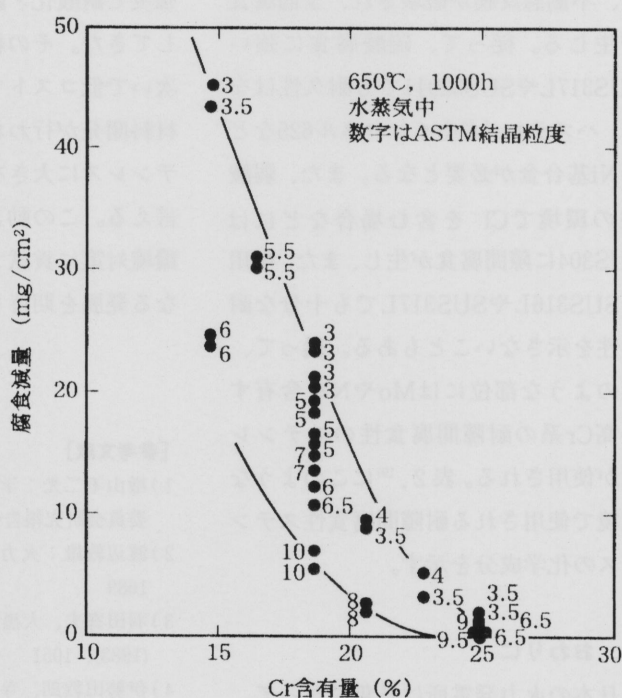


図8. Cr含有量と水蒸気酸化との関係

系に比べ高温強度のみでなく、耐高温腐食性の面からも優れた材料であると言える。

耐水蒸気酸化性も高温腐食と同様にCr量を高めることによって向上する。図8.¹⁸⁾はCr量と水蒸気酸化による腐食減量との関係を示すが、明らかにCr量の増加によって腐食減量は小さくな

る。また、図に示したように水蒸気酸化に対しては結晶粒径を小さくすることも有効であり、18Cr-8Ni系でも細粒化によって20~25%Cr系と同等以上の耐水蒸気酸化性を付与することがができる。また、オーステナイト組織の冷間加工層が水蒸気酸化スケールの生成を抑制することを利用して管内面にシ

ョットプラストを施した銅管も使用されている。

4. 環境装置におけるステンレス利用

火力発電所の環境装置の中で特にステンレスの腐食が問題となるのは排煙脱硫装置¹⁹⁾である。この中にはSO₂やCl⁻を含む強酸性または弱酸性の溶液

表 2. 耐隙間腐食性ステンレス鋼

材 質	Ni	Cr	Mo	N	Cu	その他	備 考
SUS316L	12~16	16~18	2~3	—	—	—	—
SUS317L	11~15	18~20	3~4	—	—	—	—
Alloy317LM	13~17	18~20	4~5	—	—	—	—
SUS309J3L	13~16	23~26	0.5~1.2	—	—	—	—
SUS890L	23~28	19~23	4~5	—	1~2	—	—
SUS836L	24~26	19~24	5~7	~0.25	—	—	—
Alloy625	61	21.5	9	—	—	3.5Nb	Ni基合金
AlloyC276	57	16	16	—	0.2	3.5W	Ni基合金
AlloyC22	Bal.	22	13	—	—	3W	Ni基合金
SUS329J1L	3~6	23~28	1~3	—	—	—	2相合金
SUS329J3L	4.5~6.5	21~24	2.5~3.5	0.1~0.2	—	—	2相合金
SUS329J4L	5.5~7.5	24~26	2.5~3.5	0.1~0.2	—	—	2相合金

が存在し、硫酸露点腐食や隙間腐食が発生することが知られている。ステンレスの耐硫酸腐食性はMo量やCr量が多いほど良好であるが、SO₂が存在する場合には亜硫酸による還元腐食が生じ、不動態皮膜が破壊され、全面腐食が生じる。従って、硫酸腐食に強いSUS317LやSUS329J1でも耐久性はなく、ハステロイCやインコネル625などのNi基合金が必要となる。また、弱酸性の環境でCl⁻を含む場合などにはSUS304に隙間腐食が生じ、また、現用のSUS316LやSUS317Lでも十分な耐食性を示さないこともある。従って、このような部位にはMoやNを含有する高Cr系の耐隙間腐食性のステンレスが使用される。表2.¹⁹⁾にこのような環境で使用される耐隙間腐食性ステンレスの化学成分を示す。

5. おわりに

日本の火力発電所は長年に亘って、環境保全の面から種々の環境技術を取り入れ、装置を設置してきた。そこには使用条件によってステンレスが使用され、装置の健全な運用を支えてきた。このような環境装置におけるステンレスの利用は、主として、低温での腐食防止を目的としており、この点では従来からのステンレスの利用技術と大きな差異はないと考えられる。これに対してCO₂削減あるいは環境対策を発電

効率を向上させることによって達成する方法もある。そのために種々の発電システムが研究されたが、その中で高温・高圧化を目指した超々臨界圧発電はステンレスの耐熱性、すなわち高温強度と耐酸化・耐食性を積極的に利用してきた。その結果、1980年代から相次いで低コストで耐熱性を向上させた材料開発が行われたことは、高温用ステンレスに大きな進歩をもたらしたと言える。この動きはまだ続いており、環境対策に貢献するステンレスのさらなる発展を期待したい。

[参考文献]

- 1) 増山不二光：学振、耐熱金属材料 第123委員会研究報告vol.38、No.3、(1997)
- 2) 渡辺敦雄：火力原子力発電、49 (1998)、1689
- 3) 羽田壽夫、大黒貴：火力原子力発電、34 (1983)、1051
- 4) 伊勢田敦朗、寺西洋志、吉川州彦、増山不二光、大黒貴、羽田壽夫：火力原子力発電、39 (1988)、897
- 5) A. Iseda, Y. Sawaragi, S. Kato and F. Masuyama : 5th Int. Conf. Creep of Materials, Lake Buena Vista, Florida, May 18-21, (1992)
- 6) 吉川州彦、富士川尚男、寺西洋志、湯沢浩、久保田稔：火力原子力発電、36 (1985)、1325
- 7) F. Eberle, E.G. Ely and J.S. Dillon : Trans. ASME, 76 (1956)、665
- 8) J.D. Murray : Welding and Metal Fabrication , 9 (1962)、350

9) 平野英、榎本義淳：学振、耐熱金属材料 第123委員会研究報告、29 (1988)、241

- 10) Y.Minami, K.Kimura and M.Tamimura : ASM Int. Conf. New Development in Stainless Steel Tech., Detroit, Michigan, Sept. 17-21, (1984)
- 11) M.Tamura, N.Yamanouchi, M.Tanimura and S.Murase : 1985 Expo. and Symp. Industrial Heat Exchanger Tech., Pittsburgh, Pennsylvania, Nov. 6-8, (1985)
- 12) 榎本義淳、吉川州彦：鉄と鋼、72 (1986)、S672
- 13) 榎本義淳、寺西洋志、牧浦宏文、三浦実、久保田稔：住友金属、37 (1985)、166
- 14) M.Kikuchi, M.Sakakibara, Y.Otoguro, H.Mimura, S.Araki and T.Fujita : Int. Conf. High Temperature Alloys, Petten, Netherlands, Oct. 15-17, (1985)
- 15) 遠山晃、南雄介、山田武海：材料とプロセス、1 (1988)、928
- 16) 横山知充、増山不二光：火力原子力発電、45 (1994)、1297
- 17) 池島俊夫：日本金属学会会報、22 (1983)、389
- 18) 新居和嘉 他：腐食防食協会編、金属材料の高温酸化と高温腐食、丸善、(1982)、253
- 19) 火力原子力発電技術協会：火力原子力発電、47 (1996)、871



増山 不二光(ますやま ふじみつ)

1945年 長崎県生まれ
 1970年 九州工業大学大学院修士課程(金属工学専攻)修了
 三菱重工業㈱技術本部長崎研究所
 1988年 大阪大学工学博士
 主な著書：高温機器部品の損傷メカニズムと寿命評価 他
 主な受賞：平成元年研究功績者表彰、科学技術庁長官賞
 現職 三菱重工業㈱技術本部長崎研究所主管