

特集記事 ● 4 鉄鋼材料への機能性付与
各論 用途別機能性付与(2)プラント(化学、原子力)

中性子遮蔽用ボロン添加ステンレス鋼板

Boron-bearing Stainless Steels for Thermal Neutron Shielding

坪田基司
Motoji Tsubota
及川 誠
Makoto Oikawa

(株) 東芝 電力・産業システム技術開発センター
金属・セラミックス材料開発部 主幹

(株) YAKIN川崎
技術開発室技術研究チーム 課長

1 はじめに

ボロン添加ステンレス鋼は、表1に示すようにSUS304に熱中性子吸収能が高いボロン (B) を添加したオーステナイト系ステンレス鋼であり、優れた中性子吸収能、耐食性、強度を有するため、近年、使用済み核燃料貯蔵ラック、輸送・貯蔵バスケットとして用いられる。

本報では、B添加ステンレス鋼の開発の経緯、使用例と製造技術について述べる。

2 開発の経緯と使用例

年々エネルギー消費が増加する中で、特に電気エネルギーの増加は著しく、全エネルギー消費に占める割合は1970年に26%であったものが、2000年には40%を越え、これら電力を供給する発電設備のうち既に30%を越える電力が原子力発電によってまかなわれている。現在主流の原子炉は沸騰水型 (BWR)、加圧水型 (PWR) であり、これらの原子炉はウラン燃料を使用している。原子力発電に使用される燃料は原子炉建屋内の燃料貯蔵プールに設置される燃料ラックに一時保管される。燃料ラックは水中で使用されることから、耐食性を考慮し、アルミニウム合金あるいはステンレス合金製のものが用いられてきた。

発電に利用された使用済み燃料はこの燃料ラックに保管されたあと、再処理工場に運ばれ処理される。しかし、原子力発電所の増設により、再処理される使用済み燃料が増加した

ことから、再処理を円滑に進めるため発電所の燃料ラックの収蔵量を増加したいとの要求が生まれた。

一方、天然ボロン中に約19.8%含まれるボロンの同位体である¹⁰Bは熱中性子吸収断面積が約3800barnと大きく (Feは約2.5barn)、優れた熱中性子吸収能を有することから原子炉の反応制御材 (B₄C粉末) や中性子遮蔽材などに多用されている。この熱中性子吸収能の高いBをステンレス鋼に添加したB添加ステンレス鋼が開発され、その中性子吸収能力についてはKing等¹⁾によって確認されている。この耐食性と中性子吸収能を併せ持つB添加ステンレス鋼を燃料ラックに適用することにより、保管する燃料間の遮蔽距離を短くすることが可能となり、燃料貯蔵プール内の燃料収容体数を増加することが可能となった。図1に示すように、1mass%B添加ステンレス鋼を用いた燃料ラックはスペース変更無しに、従来の約1.4倍の収容が可能となった。B添加量が高いほど熱中性子吸収能も高くなるが、製造性やその他で難が生じるため、現在ではB添加量が1mass%前後の板が多く用いられている。

一方、将来的に使用済み燃料の発生増加が見込まれることから、発電所内の燃料プールでの保管容量に不足が生じた場合を考慮して、使用済み燃料を貯蔵するための中間貯蔵施設の建設が計画されている。発電所、中間貯蔵施設、再処理工場間の輸送は図2に示すような、輸送・貯蔵容器 (キャスク) が使用される。キャスク内部には燃料を収納するためのバスケットが設けられ、バスケットの材料をB添加ステンレス鋼にすることによって、収容体数の増加が可能となる。また、

表1 1mass%B添加ステンレス鋼の化学成分例 (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B
NAS8R10	0.018	0.72	0.96	0.022	0.001	10.21	19.75	1.09
SUS304	0.044	0.61	1.07	0.028	0.002	8.52	18.23	—

中間貯蔵施設における専用貯蔵容器（キャニスタ）にも同様のバスケットが用いられる。

3 製造技術

B添加ステンレス鋼の凝固形態は図3²⁾に示すように共晶型であり、B添加量の増加と共に液相線温度は低下し、固相線温度は約1250℃で一定である。さらに、Bは活性な元素であり、 casting時に用いるモールドフラックスの特性を変化させるので、連続鑄造化には多くの研究が必要である。また、B添加ステンレス鋼は、図4に示すように、硬く脆いボライド (Fe, Cr)₂B³⁾が凝固時に晶出するために、熱間加工性に乏しく、B添加量と共に、ボライドの量が増え、さらに熱間加工性が劣化する。そのため、従来、製造工程としては、普通造塊—鍛造（または分塊圧延）—シート熱間圧延工程が主であった。

近年、製造コスト低減、需要増加への対応のために、多くの材料学的な研究^{2, 4-7)}と製造技術に関する研究⁸⁻¹²⁾が行わ

れ、連続鑄造やコイル熱間圧延も可能となった。連続鑄造工程に関しては、適正なモールドフラックスの開発、鑄造条件の適正化により、0.6 mass % B添加ステンレス鋼^{11, 12)}、そして、1 mass % B添加ステンレス鋼の連続鑄造化⁹⁾が報告されている。熱間圧延工程に関しては、熱間加工性に及ぼす鑄造方法、成分、ボライド形態の影響、あるいは、熱間圧延条件に関する研究が行われ、精錬技術や熱間圧延技術の向上に伴い、0.7 mass % B添加ステンレス鋼のコイル圧延^{6, 7)}が可能になった。さらに、図5に示すように、連続鑄造材が普通造塊材に比べ、鑄造ままでも、加工を施した後も、熱間加工性に優れることが見出され⁵⁾、1 mass % B添加ステンレス鋼については、連続鑄造—コイル熱間圧延工程も可能となった⁸⁾。

4 組織と特性

B添加ステンレス鋼板は、図6に示すように、ボライドが

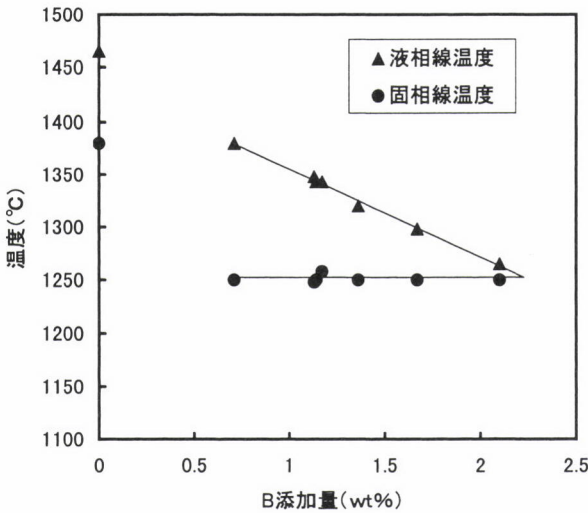
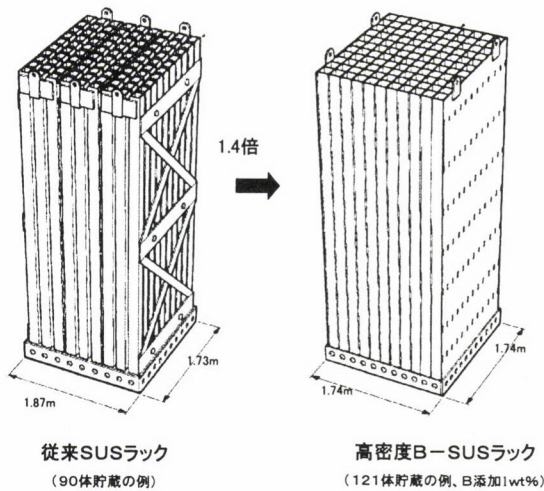


図3 液相線温度と固相線温度に及ぼすB添加量の影響

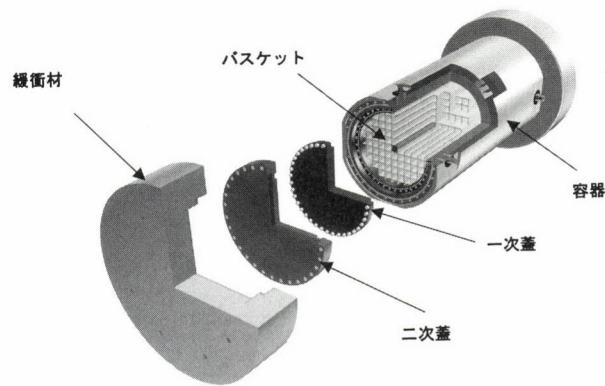


図2 輸送・貯蔵用キャスクの構造例

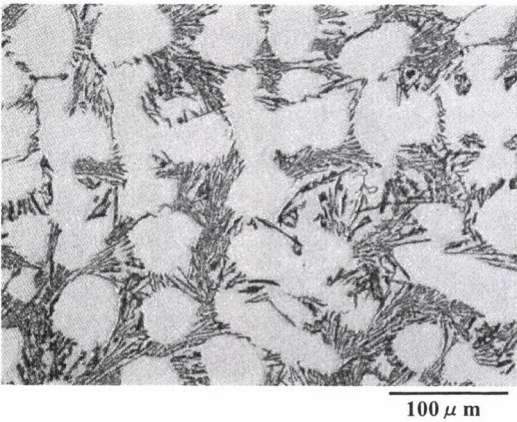


図4 1mass % B添加ステンレス鋼の鑄造組織

均一に分布しており、特性も表2に示すように、実用上十分なレベルを有する。

5 おわりに

今後も、原子力発電施設の増設に伴い、B添加ステンレス鋼の需要も増えると期待される。さらに、高機能化の要求も高まると予想され、材料学的な基礎研究と製造技術に関する研究の両方を充実させ、対応することが必要と考える。

参考文献

1) K.J. King and J. Wilkinson : STAINLESS STEEL' 84, The Institute of Metals, London, (1985), 368.
2) 及川 誠, 藤原最仁 : 日本冶金技報, 6 (1997), 10.
3) 西間 勤 : 鉄と鋼, 48 (1962) 11, 1495.

4) 及川 誠, 藤原最仁, 峠 竹弥 : CAMP-ISIJ, 9 (1996), 1238.
5) 及川 誠, 石井照彰, 轟 秀和, 諸岡道雄 : CAMP-ISIJ, 15 (2002), 1298.
6) 武本敏彦, 山崎和信, 川合 裕 : まてりあ, 35 (1996) 4, 412.
7) 岡村禎夫, 山川 博 : 日本冶金技報, 1 (1992), 70.
8) 石井照彰, 轟 秀和, 及川 誠, 水野憲次, 本郷敦哉, 田中 明 : CAMP-ISIJ, 14 (2001), 162.
9) 森川 広, 山本 修, 武本敏彦 : CAMP-ISIJ, 11 (1998), 588.
10) 森川 広, 山本 修, 武本敏彦 : CAMP-ISIJ, 11 (1998), 1155.
11) 水上英夫, 山中章裕, 川本正幸, 川東文雄, 渡部忠雄 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 1044.
12) 川本正幸, 山中章裕, 川東文雄, 加藤 徹, 吉田修二, 山崎正幸 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 1045.

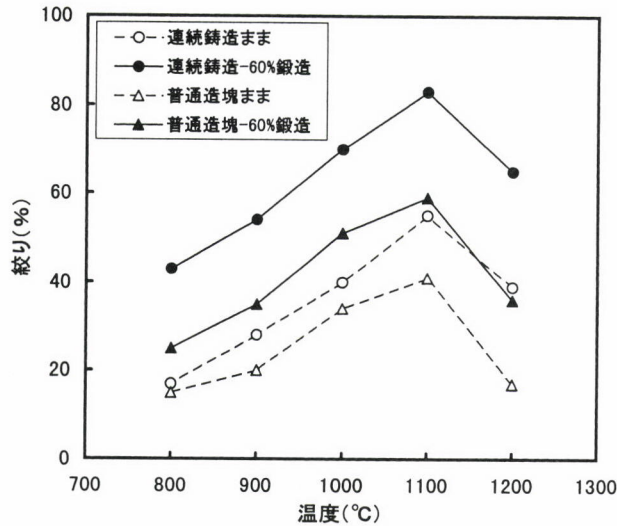


図5 熱間加工性に及ぼす凝固組織の影響

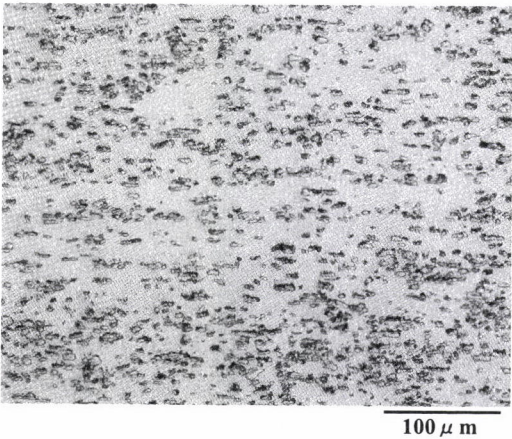


図6 1mass%B添加ステンレス鋼の組織

表2 1mass%B添加ステンレス鋼の機械的性質と耐食性

	機械的性質			耐食性
	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	伸び(%)	孔食電位 Vc'100(mV)
NAS8R10	350	660	23	168
SUS304	290	624	56	290

(2005年9月27日受付)