熱中性子遮蔽用ボロン添加 ステンレス鋼の開発

武本 敏彦¹⁾ 山崎 和信²⁾ 川合 裕³⁾

1. はじめに

石油に代わるエネルギー源として原子力発電の重要度が高まっており、現在では国内発電の20%以上を原子力発電が担い、エネルギーの安定供給に重要な役割を果たしている。原子力発電での使用済み燃料は再処理工場にて処理されるまでの間、発電所内の貯蔵プール中に容器(以下ラックと記す)に入れ保管される。ラック用材には、使用済み燃料が熱中性子を放射するため、高い熱中性子吸収能が要求される。また、構造用材料としての十分な強度と使用環境である純水またはほう酸水中での良好な耐食性を有することが要求される。これらの要求特性を満たす使用済み燃料貯蔵用ラック材としてオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)が使用されてきた。

しかし、近年、原子力発電所の増設と再処理能力の不足から使用済み燃料の発生量が増加しつつあり⁽¹⁾、貯蔵プールの燃料充填率を増加する必要性が生じてきた。そこで熱中性子吸収能の高いボロン(B)を添加したステンレス鋼を使用することにより板厚を薄くしても SUS304 と同程度の熱中性子吸収能が得られること、ラック用材の薄肉化により貯蔵プールの燃料充填率の増加が図れることから、ラック用材として B 添加ステンレス鋼の要求が高まってきた。しかしながら、従来の SUS304 板厚なみの熱中性子吸収能を薄肉化しても確保するには高濃度の B 添加が必要となるが、高濃度の B 添

加は熱間加工性を劣化させるため、B 添加ステンレス鋼をコイルで量産製造することは困難であり、これまで使用済み燃料貯蔵用ラックとしての使用実績はなかった。

そこでステンレス鋼の熱間加工性に及ぼす B の影響や熱延条件の影響を詳細に調査し、分塊圧延および熱間圧延条件をきめ細かく制御することにより、0.7 mass% までの B を添加したステンレス鋼を連続圧延により鋼帯として量産製造できる技術を確立した。本稿では使用済み燃料貯蔵用ラック材として開発した 0.6 mass%B 添加ステンレス鋼板および角管の諸特性を紹介する。

2. 開発の経緯

天然 B 中に約20%含有される ¹⁰B は熱中性子吸収断面積が大きく、B 添加により熱中性子吸収能が向上することは従来より知られている⁽²⁾。図1には武蔵工業大学の実験用原子炉にて測定した熱中性子透過率に及ぼすトータル B 量の影響を示す。熱中性子透過率は B 量とともに減少し、0.6 mass%B で SUS304 の約 1/2 となる。

図2に熱間加工性の評価方法の一つである高温引張後の断面収縮率に及ぼす B と鍛造熱処理の影響を示す。SUS304 では1300℃以下の温度で温度の低下とともに断面収縮率は減少するものの、900℃でも60%程度以上の高い断面収縮率を示す。B 添加鋼においては鋳造ままでは B 量が増加すると断面収縮率が減少するとともに、1200℃以上では断面収縮率は急激に減少し、1250℃ではゼロとなる。これは γ -Fe と Fe₂B の共晶点1226℃である⁽³⁾ことから、これ以上の温度ではボライドが溶融して変形能が劣化したものと考えられる。鋳造材に鍛造熱処理を施すと断面収縮率は著しく増加し、1.04%B 材でも 1000℃以上の温度域で60%以上の高い断面収縮率を示す。

以上の結果より、B 添加鋼の熱間加工性は SUS304 より

* 日新製鋼株式会社

1) 技術研究所ステンレス高合金研究部室長

2) 欧州事務所

3) 本社海外事業プロジェクト部担当部長

Development of Boron-containing Stainless Steel for Thermal Neutron Shielding; Toshihiko Takemoto, Kazunobu Yamasaki, Yutaka Kawai (Nisshin Steel Co. Ltd.)

1996年1月31日受理

図1 熱中性子透過率に及ぼすトータルB量の影響.

図2 高温引張特性に及ぼすBと鍛造熱処理の影響.

は劣るものの、分塊圧延を施し、かつ加熱温度と仕上げ温度を制御し熱間圧延することで製造できる可能性を見いだした(4)(5)。

そこで量産試作を実施し、分塊条件および熱間圧延条件をきめ細かく制御することにより0.5 mass%から0.7 mass%までのBを添加したステンレス鋼を連続圧延により鋼帯として量産化することに成功した。さらにこの鋼帯から造管とロール成形により角管を量産製造することが可能となった。

3. NSS304Bの諸特性

以下にラック用材として量産した0.6 mass%B添加ステ

ンレス鋼板および角管(板厚3.2 mm)の諸特性について述べる。

(1) 化学成分

表1に化学成分例、また図3に金属組織を示す。Bの添加により多量の微細なボライドが比較的均一に分散している。X線回折結果よりボライドは Cr_2B 、 Fe_2B あるいは $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ と考えられた。これらのボライドの生成によりマトリックス中のCr量が減少し耐食性を劣化させることから、CrはSUS304より高濃度の19.5 mass%に設定している。

(2) 機械的性質

表2にNSS304Bの鋼板および角管から採取した板材の機

図3 NSS304Bの金属組織.

表1 NSS304B および SUS304 の化学成分例.
(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B
NSS304B	0.026	0.55	0.95	0.021	0.001	8.28	19.59	0.60
SUS304	0.052	0.61	1.02	0.023	0.002	8.51	18.23	—

表2 NSS304B および SUS304 の機械的性質.
(板厚: 3.2 mm)

	0.2%耐力 (N/mm^2) ^{注1)}	引張強さ (N/mm^2) ^{注1)}	伸び (%) ^{注1)}	硬さ HRB	衝撃値 (J/cm^2) 273 K ^{注2)}	曲げ 加工性 180° ^{注3)}
NSS304B 鋼板	289	679	34	88	42	良好
NSS304B 角管	355	695	36	88	—	良好
SUS304 鋼板	235	666	53	88	140	良好

注1) 試験片の採取方向: L方向, 試験片: JIS-13B号

注2) " : C方向, 試験片: JIS-4号

注3) " : C方向, 試験片: JIS-1号, 室温

機械的性質を SUS304 と比較して示す。NSS304B 鋼板は SUS304 よりも高強度であり、伸びが低い。角管は鋼板よりもさらに強度は高いが、伸びは鋼板と同程度である。また曲げ半径：2 tR, 180°の密着曲げでも割れは発生せず、良好な加工性を有している。273 K での衝撃値は 42 J/cm² と SUS304 に比べて低いが、実用上問題のないレベルであると考える。

(3) 耐食性

表 3 に NSS304B の角管から採取した板材の耐食性を SUS304 と比較して示す。使用済み燃料の貯蔵環境である純水中における 353 K での 5000 h 浸漬後の腐食度は両者とも 1×10^{-7} kg/m²・h 以下である。また 323 K での塩化第二鉄溶液での 24 h 浸漬試験後の腐食度は 0.031 kg/m²・h と低く、沸騰硫酸-硫酸銅水溶液中におけるシュトラウス試験後の突き曲げ試験後でも割れは発生しない。したがって、NSS304B は SUS304 と同等の良好な耐食性を有する。

(4) 溶接継手部の特性

表 4 に NSS304B の溶接継手部の機械的性質を SUS304 と比較して示す。なお溶接は TIG にて行った。NSS304B は母材破断を呈し、0.2%耐力、引張強さは SUS304 よりも高い。また表 4 には NSS304B の衝撃値も合わせて示しているが、SUS304 よりも低いものの、表 2 の母材のそれと比較してわかるように、溶接継手は母材と同等の衝撃特性を有しており、実用上問題はないものと考えられる。

表 3 NSS304B および SUS304 の耐食性。

	純水浸漬試験 353 K, 5000 h (kg/m ² ・h)	塩化第二鉄浸漬試験 323 K, 24 h (kg/m ² ・h)	シュトラウス試験 (硫酸-硫酸銅) 沸騰, 16 h
NSS304B	$\leq 1 \times 10^{-7}$	0.031	割れなし
SUS304	$\leq 1 \times 10^{-7}$	0.029	割れなし

表 4 NSS304B および SUS304 の溶接継手部の機械的性質。
(板厚：3.2 mm)

	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	衝撃値 (J/cm ²) at 273 K
NSS304B	290	681	30	37
SUS304	285	616	50	185

4. 実 用 例

図 4 に NSS304B 角管を使用済み燃料貯蔵ラックに施工した例を示す⁽⁵⁾。当社の B 添加ステンレス鋼は昭和 61 年使用済み燃料貯蔵ラック用材の世界初物件として採用された。その後、原子力発電所の増設あるいは新設に伴い採用実績が増加し、現在までに累計で約 1500 トンの納入実績がある。今後も原子力発電所の増設に伴う使用済み燃料の増加が予想されており、貯蔵ラック、さらには燃料輸送キャスクへの需要の増加が期待できる。

図 4 NSS304B の使用例⁽⁶⁾。

5. 特 許

特許第 1997501 号，特開昭 63-96211 号，他 6 件出願。

文 献

- (1) 加藤恭義，小沢義弘，橋本貴久裕，広瀬保男：日立評論，**33**，No. 6 (1986)，43.
- (2) 上田長正，古屋武美：神戸製鋼技報，**33**，No. 1 (1983)，93.
- (3) 金子秀夫，西沢泰二，千葉 昂：日本金属学会誌，**30**(1966)，157.
- (4) 大崎慶治，川合 裕：日新製鋼技報，**57**(1987)，64.
- (5) 山崎和信，武本敏彦：日新製鋼技報，**66**(1991)，110.
- (6) ㈱東芝カタログ「原子炉機器部カタログ」，p. 15.