

エネルギープラント向け極厚 Cr-Mo 鋼板

Heavy Thickness Cr-Mo Steel Plates for Energy Plants

1. はじめに

石油精製装置などの化学プラントや発電設備など、エネルギープラント分野では種々の鋼板が使用されている。近年、これらの設備の大型化、操業条件、使用環境の苛酷化、さらに建設コストの低減を目的とした施工の高効率化などにより、使用される鋼材に対しても厚肉化、広幅化および長尺化による製品重量の大単重化が志向されるとともに、高強度化による薄肉化、靱性や溶接施工性の向上などが要求されている。また、世界的なエネルギー需要の増大から、エネルギープラントの建設が活発化しており、高性能鋼のニーズが高まっている。

JFE スチールではこのようなニーズに応えるため、極厚 Cr-Mo 鋼板を開発している^{1,4)}。ここでは、エネルギープラント向けに開発した各種極厚 Cr-Mo 鋼板を紹介する。

2. 極厚 Cr-Mo 鋼板の製造技術

2.1 造塊および鍛造・圧延による極厚鋼製造技術

JFE スチールでは、大単重極厚鋼板の製造プロセスとして、連続鋳造プロセスに加えて、LD 転炉-RH 真空脱ガス工程による高純度鋼の溶製による 120 t までの大型鋼塊を製造可能な造塊プロセスを有している。また、分塊圧延機や厚板圧延機に加えて、6000 t の自由鍛造プロセス（写真 1）を有しており、高品質の極厚大単重鋼の製造が可能である^{1,2)}。

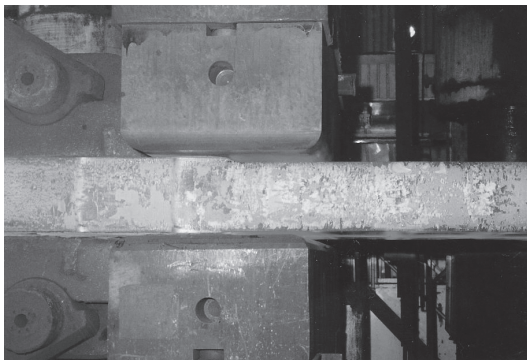


写真 1 鍛造プロセスの適用例（連続鋳造スラブ）

Photo 1 Forging reduction in thicknesswise of continuous casting (CC) slab

表 1 主要新特厚熱処理設備の仕様²⁾

Table 1 Capacity of main equipment

| Equipment | Capacity |
|----------------------------------|--|
| Batch type heat treating furnace | Capacity: 150 t Max. temperature: 1 050°C Effective height: 400 mm |
| Quenching pit | Dipping type |
| Surface grinder | Max. thickness: 450 mm Rough and fine whetstone |
| Flame cutter | Max. thickness: 400 mm |

2.2 大単重熱処理技術

極厚・広幅・長尺の大単重熱処理材の製造に対応した新熱処理工場（新特厚設備、表 1）が 2011 年に立ち上がり、JFE スチールでは、厚さ 400 mm までの極厚鋼板の台車式熱処理炉による高温熱処理（～1 050°C）および水槽浸漬設備による焼入れ熱処理が可能となっている²⁾。

3. 各種極厚高性能 Cr-Mo 鋼の特性

2 章で述べた極厚鋼製造プロセスにより、JFE スチールは厚板規格のみならず、鍛鋼品規格の高品質極厚熱処理鋼の製造が可能である。エネルギープラント向けの主な圧力容器用 Cr-Mo 鋼板・鍛鋼品の海外 ASME および国内 JIS 規格の一例を表 2 に示す。これらの鋼板・鍛鋼品規格を対象に、極厚高性能 Cr-Mo 鋼を開発しており、既に豊富な製造実績を有している。以下にその特性例を示す。（ASME：The American Society of Mechanical Engineers, JIS：日本工業規格）

表 2 主な圧力容器用 Cr-Mo 鋼板・鍛鋼品規格

Table 2 Specifications for typical Cr-Mo steel plates and forgings

| | ASME | | JIS | |
|--------------|-------------|--------------|---------|-------------|
| | Plate | Forging | Plate | Forging |
| 1Cr-0.5Mo | SA-387-12-2 | SA-336-F12 | SCMV2-2 | SFVA F 12 |
| 1.25Cr-0.5Mo | SA-387-11-2 | SA-336-F11-3 | SCMV3-2 | SFVA F 11 B |
| 2.25Cr-1Mo | SA-387-22-2 | SA-336-F22-3 | SCMV4-2 | SFVA F 11 B |
| 2.25Cr-1Mo-V | SA-542-D-4a | SA-336-F22V | SCMQ4V | SFVCM F22V |

ASME: The American Society of Mechanical Engineers
JIS: Japanese Industrial Standards

表 3 各種 1.25Cr-0.5Mo 鋼の化学成分

Table 3 Chemical compositions of 1.25Cr-0.5Mo steel (mass%)

| Thickness (mm) | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Others |
|----------------|------|------|------|-------|--------|------|------|---------------|
| 130 | 0.14 | 0.55 | 0.44 | 0.004 | 0.001 | 1.44 | 0.62 | Cu, Ni |
| 279 | 0.14 | 0.54 | 0.59 | 0.003 | <0.001 | 1.44 | 0.60 | Cu, Ni, Ti, B |
| 380 | 0.14 | 0.54 | 0.59 | 0.003 | <0.001 | 1.44 | 0.60 | Cu, Ni, Ti, B |

表 4 厚肉 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (SA-387-11-2) の機械的性質

Table 4 Mechanical properties of 1.25Cr-0.5Mo steel (SA-387 Gr.11 Cl.2)

| Thickness (mm) | PWHT | Tensile properties | | | | | Charpy impact properties | | |
|----------------|----------------|---------------------|----------|----------|--------|--------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Position, Direction | YS (MPa) | TS (MPa) | El (%) | RA (%) | Position, Direction | vE _{-10°C} (J) | vE _{-20°C} (J) |
| 130 | 691°C × 21.5 h | 1/4t-C | 417 | 571 | 31 | 78 | 1/4t-C | 333 | 321 |
| | | 1/2t-C | 385 | 555 | 30 | 78 | 1/2t-C | 277 | 229 |
| | 675°C × 6 h | 1/4t-C | 472 | 624 | 29 | 77 | 1/4t-C | 337 | 308 |
| | | 1/2t-C | 446 | 606 | 28 | 78 | 1/2t-C | 355 | 302 |

SA-387 Gr.11 Cl.2 Specification: YS≥310 MPa, 517≤TS≤690 MPa, El≥22% vE_{-18°C}≥54 J (API RP 934-C, t≤100 mm)

YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, RA: Reduction in area vE: Absorbed energy

3.1 極厚高性能 1.25Cr-0.5Mo 鋼

1.25Cr-0.5Mo 鋼はエネルギー分野の幅広い用途で使用されており、極厚材において、溶接後熱処理 (PWHT) 条件が高温・長時間化されるとともに、板厚中心 (1/2t) 位置を含めて靱性要求が厳格化される傾向にある。JFE スチールでは、これらのニーズに対応した各種の極厚 1.25Cr-0.5Mo 鋼を開発している。化学成分の一例を表 3 に示す。不純物元素を低く制限するとともに、マイクロ組織制御のためのマイクロアロイ元素を活用している。

3.1.1 厚肉高靱性 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (SA-387 Gr.11 Cl.2)

板厚 130 mm の造塊-分塊圧延-厚板圧延熱処理 (Q-T) プロセスによって製造した 1.25Cr-0.5Mo 鋼板 (ASME SA-387 Gr.11 Cl.2) の機械的性質を表 4 に示す。ASME 規格を十分に満足するとともに、1/2t 位置においても、-20°C における高いシャルピー吸収エネルギーが得られている。

3.1.2 極厚高靱性 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (SA-336 Gr.11 Cl.3)

板厚 279 mm の造塊-鍛造-厚板圧延熱処理 (Q-T) プロセスによって製造した 1.25Cr-0.5Mo 鍛鋼品 (SA-336 Gr.11 Cl.3) の母材の機械的性質を表 5 に示す。ASME 規格を十分に満足するとともに、1/2t 位置において、-10°C における高いシャルピー吸収エネルギーが得られている。また、1/2t 位置の板厚方向 (Z 方向) 引張試験において高い破断絞り (RA) 値が得られており、良好な板厚中心内質特性を有している。

3.1.3 超極厚 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (SCMV3-2 Mod.)

板厚 380 mm の造塊-鍛造-厚板圧延熱処理 (Q-T) プロセスによって製造した超極厚 1.25Cr-0.5Mo 鋼板 (JIS SCMV3-

表 5 極厚 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (SA-336-11-3) の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of 1.25Cr-0.5Mo steel (SA-336 Gr.11 Cl.3)

| Thickness (mm) | PWHT | Tensile properties | | | | | Charpy impact properties | | |
|----------------|--------------|---------------------|----------|----------|--------|--------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| | | Position, Direction | YS (MPa) | TS (MPa) | El (%) | RA (%) | Position, Direction | vE _{0°C} (J) | vE _{-8°C} (J) |
| 279 | 691°C × 20 h | 1/4t-C | 374 | 543 | 29 | 76 | 1/4t-L | 404 | 265 |
| | | 1/2t-C | 381 | 561 | 29 | 74 | 1/2t-L | 329 | 168 |
| | | 1/2t-Z | — | 560 | — | 73 | — | — | — |
| | 691°C × 4 h | 1/4t-C | 400 | 563 | 29 | 76 | 1/4t-L | 414 | 313 |
| | | 1/2t-C | 403 | 580 | 29 | 71 | 1/2t-L | 118 | 243 |
| | | 1/2t-Z | — | 580 | — | 64 | — | — | — |

SA-336Gr.11 Cl.3 Specification: YS≥310 MPa, 517≤TS≤690 MPa, El≥18%, RA≥40%

YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, RA: Reduction in area vE: Absorbed energy

表 6 超極厚 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (SCMV3-2 Mod.) の機械的性質

Table 6 Mechanical properties of 1.25Cr-0.5Mo steel (JIS SCMV3-2 Mod.)

| Thickness (mm) | PWHT | Tensile properties | | | | | Charpy impact properties | | |
|----------------|----------------|---------------------|----------|----------|--------|--------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | | Position, Direction | YS (MPa) | TS (MPa) | El (%) | RA (%) | Position, Direction | vE _{0°C} (J) | vE _{-10°C} (J) |
| 380 | 710°C × 21.6 h | 1/4t-C | 351 | 527 | 32 | 78 | 1/4t-L | 315 | 414 |
| | | 1/2t-C | 357 | 530 | 32 | 76 | 1/2t-L | 191 | 243 |
| | 710°C × 9.2 h | 1/4t-C | 377 | 548 | 32 | 77 | 1/4t-L | 411 | 423 |
| | | 1/2t-C | 382 | 550 | 31 | 79 | 1/2t-L | 403 | 383 |
| | — | 1/2t-Z | — | 657 | — | 59 | — | — | — |

SCMV3-2 Specification (t≤200 mm): YS≥315 MPa, 520≤TS≤690 MPa, El≥22%

YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, RA: Reduction in area vE: Absorbed energy

2 Mod.) の母材の機械的性質を表 6 に示す。板厚 380 mm の 1/2t 位置の長時間 PWHT 後においても JIS SCMV3-2 相当の強度が得られる。また、板厚中心位置の優れた内質特性 (Z 方向特性) およびシャルピー衝撃特性が得られている。

3.2 極厚高強度 2.25Cr-1Mo-V 鋼 (ASME SA-542 Gr.D Cl.4a)

造塊-分塊圧延-厚板圧延熱処理 (N-Q-T) プロセスによって製造した板厚 210 mm の極厚高強度 2.25Cr-1Mo-V 鋼 (ASME SA-542 Gr.D Cl.4a) の化学成分を表 7 に、引張特性を表 8 に、シャルピー衝撃特性および焼戻脆化特性を表 9 に示す。不純物元素の低減とマイクロアロイ元素の活用による成分設計および極厚鋼の圧延・高温熱処理技術により、長時間 PWHT 後においても優れた強度・高温強度ならびに低温靱性を有するとともに、良好な耐焼戻脆化特性が得られている。

表 7 2.25Cr-1Mo-V 鋼 (SA-542-D-4a) の化学成分

Table 7 Chemical compositions of 2.25Cr-1Mo-V steel (SA-542 Gr. D Cl. 4a) (mass%)

| Thickness (mm) | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | V | Others | J-Factor |
|----------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------------------|----------|
| 210 | 0.14 | 0.04 | 0.55 | 0.009 | 0.001 | 2.41 | 1.07 | 0.32 | Cu, Ni, Nb, Ti, B | 55.5 |

$J\text{-Factor} = (\text{Si} + \text{Mn}) (\text{P} + \text{Sn}) \times 10^4$

表 8 2.25Cr-1Mo-V 鋼 (SA-542-D-4a) の引張特性

Table 8 Tensile properties of 2.25Cr-1Mo-V steel (SA-542 Gr.D Cl.4a)

| Thickness (mm) | PWHT | Tensile properties | | | | | High-temperature tensile properties | |
|----------------|----------------|---------------------|----------|----------|--------|--------|-------------------------------------|----------------|
| | | Position, Direction | YS (MPa) | TS (MPa) | El (%) | RA (%) | 454°C YS (MPa) | 454°C TS (MPa) |
| 210 | 712°C × 34.3 h | 1/4t-C | 499 | 625 | 26 | 78 | — | — |
| | | 1/2t-C | 490 | 617 | 26 | 79 | 396 | 476 |
| | | 1/2t-Z | — | 627 | — | 76 | — | — |
| | 698°C × 7 h | 1/4t-C | 557 | 673 | 26 | 79 | — | — |
| | | 1/2t-C | 549 | 665 | 25 | 78 | — | — |
| | | 1/2t-Z | — | 679 | — | 76 | — | — |

SA-542Gr. D Cl. 4a Specification: YS ≥ 414 MPa, 587 ≤ TS ≤ 758 MPa, El ≥ 18%

YS (454°C) ≥ 338 MPa (Sy), TS (454°C) ≥ 456 MPa (0.9 Su)

YS: Yield strength, TS: Tensile strength, El: Elongation, RA: Reduction in area

4. おわりに

最新の極厚鋼製造技術とマイクロアロイング技術を活用して製造した極厚 Cr-Mo 鋼板は、優れた内質特性を有しているとともに、板厚中心位置を含めて優れた強度と韌性が

表 9 2.25Cr-1Mo-V 鋼 (SA-542-D-4a) のシャルピー衝撃特性および焼戻脆化特性

Table 9 Charpy impact properties and temper embrittlement properties of 2.25Cr-1Mo-V steel (SA-542 Gr.D Cl.4a)

| Thickness (mm) | PWHT | Charpy impact properties | | | | | After Step cooling | |
|----------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|------------|--------------------|------------|
| | | Position, Direction | vE _{-29°C} (J) | vE _{-50°C} (J) | vTrs (°C) | vTr55 (°C) | vTrs (°C) | vTr55 (°C) |
| 210 | 712°C × 34.3 h | 1/4t-C | 288 | 190 | -57 | — | — | — |
| | | 1/2t-C | 189 | 159 | -49 | — | — | — |
| | 698°C × 7 h | 1/4t-C | 240 | 196 | -62 | — | — | — |
| | | 1/2t-C | 205 | 108 | -46 | -62 | -47 | -72 |

SA-542Gr.D Cl.4a Specification: vE_{-18°C} ≥ 55 J, vE_{-29°C} ≥ 55 J (API RP 934-A)

vE: Absorbed energy, vTrs: Fracture appearance transition temperature, vTr55: 55 J Transition temperature

得られている。各種エネルギープラント用に、厚板規格のみならず、鍛鋼品規格として適用実績を挙げており、従来鍛鋼品が使用されていた部位に溶接構造用厚板製品としても適用され、構造物としてのコスト低減に寄与している。今後幅広く適用されることが期待される。

参考文献

- 1) 荒木清己ほか. 圧力技術. 2003, vol. 41, no. 4, p. 168-175.
- 2) 荒木清己ほか. JFE 技報. 2012, no. 29, p. 54-60.
- 3) 林謙次ほか. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 56-62.
- 4) 林謙次ほか. 配管技術. 2001-02, no. 5, p. 36-41.

〈問い合わせ先〉

JFE スチール 厚板セクター部

TEL: 03-3597-3531 FAX: 03-3597-3533

ホームページ: <http://www.jfe-steel.co.jp/products/atuita/index.html>