C214 700℃級先進型超々臨界圧蒸気タービン用蒸気弁の試作と機械特性評価

Trial manufacturing and mechanical property evaluation of steam turbine valve model for advanced ultra super critical power generation system

○ 今井 潔 (東芝)
宮下 重和 (東芝)
須賀 威夫 (東芝)

根本 邦義 (東芝)
山田 政之 (東芝)
正 大藤 朋男 (東芝)

Kiyoshi IMAI, Kuniyoshi NEMOTO, Shigekazu MIYASHITA, Masayuki YAMADA
Takeo SUGA, Tomoo OOFUJI
Toshiba Corporation, 2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045, Japan

A full size steam turbine valve model for 700℃ class advanced ultra super critical steam turbine power generation system was manufactured by Nickel based casting alloy "ASTM A494 CW6MC". The valve model was manufactured by double melt process (Electro furnace and AOD) and casted in atmosphere. Alloy composition and tensile properties of the valve model were satisfied with a specification of the casting alloy. 700℃・10⁵ hours creep rupture strength of the valve model was 80MPa or more.

Key Words: Steam Turbine, Ultra Super Critical Steam Condition, Ni based alloy, Casting

1. はじめに

近年、中国やアジア各国などの経済発展によりエネルギー需要が高まり、石油や天然ガスなどの化石燃料の価格が上昇している。この傾向はこれからも当分続くと思われ、将来的にも化石燃料の更なる価格上昇は必然的な様相を呈している。一方で、電力自由化が活発化されるなかで競争に打ち勝つため、安価な電力が今まで以上に求められている。

こうした状況下において、発電分野でも石油、天然ガス、石炭などの化石燃料を効率良く使用する技術の確立が重要になっている。なかでも、豊富な埋蔵量で安定的に供給が可能な石炭を効率的に使用する技術が、従来以上に重要な役割を担うと考えられる。その技術の一例として、超々臨界圧 (USC: Ultra Super Critical condition) 汽力発電プラントの高効率化が挙げられる。

本稿は USC 技術に関して、現在より更に蒸気条件を高温度化させて大幅な効率向上を目指す 700℃級先進型超々臨界圧 (A-USC: Advanced Ultra Super Critical condition) 蒸気タービンシステムに必要な、耐熱材料による大型部品の製造の可否と得られる材料特性に関して報告する。

2. 先進型超々臨界圧蒸気タービンの課題⁽¹⁾

汽力発電システムにおいては、長い間主蒸気温度 538℃、再熱蒸気温度 566℃が標準的であった。しかしプラントの高効率化を狙って 1990 年代から蒸気温度の高いプラントが登場し、最近では主蒸気 600℃/再熱蒸気 610℃のプラントが実現している。ここから更に温度条件を 700℃級まで高温化させて熱効率を大幅に向上させるものが先進型超々臨界圧 (A-USC) 蒸気タービン技術である。送電端熱効率は 600℃級プラントで 42%程度であるのに対し、A-USC プラントでは 46%以上が期待できる⁽²⁾。

A-USC 成立の鍵となる技術の一つが、超耐熱合金による大型タービン部品の製造である。A-USC システム

の主要構造材料は、これまで経験のない 700℃前後の高温蒸気に暴露されるため、従来のフェライト系耐熱鋼である 1%CrMoV 鋼、12%Cr 鋼の高温強度を凌ぐニッケル基耐熱材料の適用が必要となる。ニッケル基耐熱材料をタービンケーシングなどの大型部品に適用する場合の課題は、その製造限界サイズである。ニッケル基耐熱材料は、航空機用や発電用ガスタービン動・静翼などに広く用いられている。ただし、これら部品のサイズは数 10 kg の規模に止まっている。これに対し、蒸気タービン用部品は数トン～30 トンのサイズであることから、A-USC タービンシステムを実現するには、ニッケル基耐熱材料で数トン規模の部品を製作する必要がある。ニッケル基合金はその複雑な合金組成より、凝固に際して合金組成の不均一が生じるリスクが高いことから、大型部品製造上の課題整理と対策の立案が必要である。しかしながら、ニッケル基耐熱材料による大型蒸気タービン部品製造に関しては、ロータを念頭ににした鍛造に関する報告は見られるものの^{(3)~(5)}、鍛造部品に関する報告は少ない。

そこで、高温ケーシングや蒸気弁など大型静止部品の一般的製法である鍛造に着目し、ニッケル基耐熱材料の機械的特性におよぼす鍛造の影響を明らかにすることを目的とした。ここでは、ニッケル基耐熱材料で、蒸気弁の実寸大モデルを試作し、各種機械的特性の評価を実施した。

3. ニッケル基耐熱合金製蒸気弁モデルの試作

試作に使用するニッケル基合金には、優れた高温強度とともに、溶解・鍛造に際しての作業性、溶接性も考慮した結果、Ni-20%Cr-9%Mo-3.5%Nb 鍛造合金である ASTM A494 CW6MC (UNS N06625 相当材。以後、Alloy625 と呼ぶ) を選定した。

試作した弁モデルの形状は、口径約 400mm、質量約 3.5 トン、最大肉厚 150mm のものである。図 1 に試作した蒸気弁モデル外観を示す。

製造方法の概略は以下の通りである。

- ①木型製造および砂型製造
- ②電気炉溶解
- ③AOD(Argon Oxygen Decarburization)二次精錬
- ④大気中 casting
- ⑤非破壊検査
- ⑥熱処理

casting 姿勢、注湯口位置、押し湯・余肉配置などの casting 方案は、凝固シミュレーションを活用して最適化した。 casting は図1に示した姿勢で実施し、注湯口はBottom側に設置され、溶湯はBottom側よりTop側へ凝固し、押し湯内で最終凝固する計画とした。

Fig.1 Full size turbine valve model (3.5ton)

4. 試作弁モデルの機械特性評価

試作した蒸気弁モデルより各種試験片を採取し、機械試験を実施した。実施した項目は、各部位の合金成分分析、引張試験、クリープ破断試験である。

表1に、材料仕様に定められた合金組成範囲、取鍋分析値および製品各部の分析値を示す。いずれの元素も試料採取位置に関わらず材料仕様を満たしている。これより本合金は、合金成分の変動が少ない均一な大型 casting 部品が製造可能と考えられる。

Table 1 Chemical composition of valve model

	Ni	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb
Spec.	Bal.	≤0.06	≤1.000	≤1.000	≤0.015	≤0.015	20.0~23.0	8.00~10.00	3.15~4.50
Ladle	Bal.	0.015	0.30	0.18	0.007	0.008	20.4	9.03	3.46
Top	Bal.	0.008	0.28	0.20	0.009	0.004	20.3	9.01	3.15
Middle	Bal.	0.007	0.30	0.20	0.011	0.005	20.2	9.14	3.45
Bottom	Bal.	0.008	0.34	0.20	0.010	0.006	20.2	9.20	3.51

図2に、室温引張試験結果を材料仕様と共に示す。耐力、引張強さ、破断伸び、いずれも材料仕様を満たしており、大型部品製造に伴う強度低下は生じていないことが判る。

図3に、試作弁から採取したクリープ試験片によるクリープ破断試験結果を、ラーソン・ミラーパラメータ($C=20$)から、 10^5 時間破断温度に換算して整理した結果を示す。図中には、既往の蒸気タービンで使用される1%CrMoV 鋼、12%Cr 鋼、改良12%Cr 鋼の同様なクリープ破断データも併せて示す。これによると、本試作弁のA-USCシステム蒸気温度である700℃の 10^5 時間破断強度は80MPa以上である。

Fig.2 Tensile test results at 20°C

Fig.3 Creep rupture strength

現状の USC システムで使用されている12%Cr 鋼の600℃における 10^5 時間破断強度が80MPa前後であることを考慮すると、本系材料を用いることにより現行 USC システムの設計手法を用いてA-USCシステムが設計可能であると考えられる。

4. まとめ

700℃級先進型超々臨界圧タービンシステム(A-USC)用大型ニッケル基 casting 部品の製造性を検証する目的で、実機寸法の蒸気弁を試作した。試作した弁の機械的特性を評価した結果、以下が得られた。

- ①試作弁各部の合金成分はいずれも材料仕様を満たしており、合金成分の変動が少ない大型 casting 部品が得られた。
- ②引張特性は材料仕様を満たしていた。これより、大型部品製造による強度低下はないことがわかった。
- ③700℃・ 10^5 時間クリープ破断強度は約80 MPa以上であった。

参考文献

- (1)須賀、第13回動力・エネルギー・シボ・シム講演論文集,p481
- (2)700℃級超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発-経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO₂排出削減研究-」成果報告書,エネルギー総合工学研究所(2006)
- (3)今井、第13回動力・エネルギー・シボ・シム講演論文集,p353
- (4)今井、平成20年度火力原子力発電大会論文集,p98
- (5)Miyashita, Proc.34th MPA-Seminar(2008), p15.1