超電導発電機用大型 Ni 基合金回転子の開発

松本 修¹⁾ 村井 康生²⁾
津田 陽一¹⁾ 鈴木 信久²⁾

1. はじめに

年々増大する電力需要に対して省エネルギーおよび環境保全への配慮が注目されている中、通産省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として超電導発電機の開発を新エネルギー産業技術総合開発機構が推進している。超電導発電機は界磁巻線に金属超電導線を用い、液体ヘリウム中(4 K)で冷却し、超電導状態(電気抵抗が0の状態)で発電することにより、従来の発電機に比べ、下記の効果が期待できる。

- (1) 発電効率が1%増加する。
 - (2) 発電機が小型軽量化(従来の1/2の大きさ)する。
 - (3) 系統安定度が向上し、送電電力が1.2~1.5倍になる。
- これらの省エネルギー効果により、実用化されれば、CO₂排出量が大幅に削減でき地球環境保全問題にも大きく貢献できる。上記の効果に加えて、励磁の速応制御を可能(超速応型)にすることにより系統安定度を大幅に増大させることができ、多額の送電線設備費の節約が可能になる。この超速応型超電導発電機の回転子構造材料には常温から極低温(4 K)の温度域まで高強度、高電気抵抗率、高靱性、および良好な溶接性を有する非磁性合金が必要となる。また、大型鍛造品が必要となるため、内部品質の優れた鋳塊および均質な大型鍛造品の製造技術を確立することが重要である。著者らは、高強度のNi基耐熱超合金をベースに改良を加え、常温から極低温まで強度、電気抵抗率、靱性が高く、溶接性の良好なNi基超合金の母材および溶接材料を開発した。また、Ni基

超合金としては世界最大級の14トンの大型鋳塊ならびにその鍛造品の製造技術を開発し、発電容量としては世界最大の70 MW 超速応型超電導発電機用の回転子の製造に成功した。

2. 母材および溶接材料用合金の開発

(1) 母材合金の開発

超電導発電機の回転子鍛造品の母材の候補材としては、従来からガスタービン部品などに使用されているNi基の耐熱超合金である706や718合金が挙げられる。これらの合金は高強度であるが、溶接熱影響部(HAZ)にマイクロ割れを生じる問題がある。これは粒界のNbCの溶融が原因とされている⁽¹⁾。また、鋳塊を大型化すると、Nb, Ti等のマクロ偏析によりフレックルと呼ばれる炭化物、Laves相を主とした析出物の密集帯を生じ、靱性を著しく劣化させる問題がある⁽²⁾。しかし、NbやTiは γ' や γ'' 相による析出強化に必要な成分である。そこで上記従来合金を基本成分とした20 kgの小型溶解材を用い、強度、靱性、溶接性におよぼすNbとTiの影響を調査した。その結果、図1および図2に示すように要求強度、靱性を満足し、HAZ割れを抑制できる合金として、Nb, Tiを $3.5 \leq (\text{Nb} + \text{Ti}) \text{ wt} \% \leq 4.5$ の範囲に制御し、C, Si, Bを低下した40Ni-15Cr-2.3Nb-1.5Ti-Fe合金を新しく開発した⁽³⁾。

(2) 溶接材料用合金の開発

溶接材料は従来718合金のTIG溶接材料(ワイヤ)が市販されているが、30 mmを超えるような厚肉溶接部には溶接金属に割れが発生し、また靱性が低く要求性能を満足しない問題がある。そこで母材と同様に小型溶解材から種々のTIG溶接ワイヤを製造し、30 mm厚みの板の継手溶接を行い、溶接施工条件を変化させて溶接部の割れ感受性および機械的性質を調査した。その結果、割れ発生の原因となる炭化物やLaves相などの有害相の析出物を抑制し、良好な靱性

* 株式会社神戸製鋼所

1) 鋳鍛鋼工場担当課長 2) 材料研究所主任研究員

** 株式会社東芝

1) 重電技術研究所主務 2) 京浜事業所機器装置部主務
Development of Ni-base Superalloy Rotor Forging for Superconducting Generators; Osamu Matsumoto*, Yasuo Murai*, Yoichi Tsuda**, Nobuhisa Suzuki** (*Kobe Steel Ltd., **Toshiba Corporation)

1998年1月26日受理

を有する溶接材料用の合金としてNb, Si, Bを低減した51Ni-15Cr-3Mo-2.7Nb-1.7Ti-Fe合金⁽³⁾を開発した。図3に示したように開発合金の溶接金属は従来合金にくらべて、優れた靱性が得られている。

図1 室温および4 Kでの0.2%耐力と(Nb+Ti)量の関係。

図2 溶接熱影響部(HAZ)割れ最大長さと(Nb+Ti)量の関係。

図3 開発材と従来材の溶接金属部の靱性比較。

(3) 大型化技術の開発

Ni基超合金は析出強化元素や固溶強化元素を多く含んでいるため、通常、ESR(エレクトロスラグ再溶解)あるいはVAR(真空アーク再溶解)など2次溶解によって鋳塊を製造し、凝固組織の均質化および微細化を図っている。しかし、数トンを超える大型鍛造品の製造には限界があった。それは前述したように、鋳塊を大型化するとフレックルを生じ、靱性などの機械的性質を著しく劣化させる問題があるためである。大型化技術の開発は、2トン鋳塊⁽⁴⁾、7トン鋳塊、11トン鋳塊⁽⁵⁾と徐々に大型化の試作を進めながら、大型ESR溶解条件、大型鍛造品内部全体に渡る均質な性能を得るための結晶粒微細化鍛造方法の検証を行い性能評価を行った。その結果、ESR溶解速度を低速かつ安定的に操業することによって、内部品質の優れた世界最大級の鋳塊が製造でき、また、鍛造温度と歪量を最適にコントロールすることにより、均質かつ微細な結晶粒組織を有した大型鍛造品の製造を可能にした。

3. 70 MW 超電導発電機回転子の製造

(1) 製造

上記の検討結果に基づき、70 MW 超電導発電機の回転子の製造を行った。超電導発電機回転子は巻線取付軸部とトルクチューブとから成り、これらを溶接して製造する。それぞれの製造工程を図4に示す。1次溶解は電弧炉および真空取鍋精錬炉により行い、ESR電極とした。ついで、ESRを行い、直径810 mm、質量14トンの大型鋳塊とした。本ESR鋼塊は最大13000トン容量のプレスを用いて圧縮、鍛伸を繰り返す行い、最終的に円柱軸形状に鍛造した。回転子両端に取り付けられるトルクチューブも、同一成分の2トンのESR鋳塊からリング鍛造により製造した。これら鍛造品は溶接前溶体化処理を行い、開先加工を行った後、開発した溶接材料(ワイヤ)を用いてTIG溶接を行った。再度、溶体化処理後、界磁巻線を取り付けるスロット(溝)等の粗加工後、時効処理を行い強度を付与した。性能評価は回転子の種々の部位から試験片を採取し、材料試験、物理試験を行った。

回転子の概略形状と試験片採取位置を図5に示す。溶接部の評価は取付軸およびトルクチューブ余長部から切断したリング材を用いて、本体と同一条件で溶接、熱処理したテストリング継手を製作し、これから試験片を採取し、各種材料試験を行った。

(2) 評価

回転子各部位の主要化学成分を表1に示す。巻線取付軸はNi基超合金としては世界最大級の鋳塊であるが、目標通りの成分が得られている。また、各部位の機械的性質は表2に示すように要求性能を十分満足するものであり、極低温にお

図4 70 MW 超電導発電機回転子主要製造工程.

図5 回転子概略形状と試験片採取位置.

図6 70 MW 超電導発電機回転子素材外観写真.

いても良好な結果が得られた。図6には本70 MW 超電導発電機回転子の界磁巻線(超電導線)取付け前の外観写真を示す。

現在、この70 MW 機は回転子の製作はほぼ完了し、98年度半ばから関西電力(株)大阪発電所内に設けられた試験センターにて発電運転予定であり、実用化に向けて着実な進歩を遂げている。

表1 回転子各部位の主要化学成分(wt%) .

部 位		C	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Fe
巻 線 取付軸	A	0.02	0.08	40.7	14.8	—	0.14	1.6	2.4	Bal.
	B	0.02	0.12	40.6	14.8	—	0.15	1.5	2.4	Bal.
ト ル ク チューブ		0.02	0.09	40.4	14.8	—	0.15	1.5	2.3	Bal.
溶接金属部		0.02	0.01	50.0	15.1	2.8	0.26	1.7	2.7	Bal.

表2 回転子の材料試験結果.

試験 温度	試 験 片 採取位置	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	衝撃呼吸 エネルギー (J)	電 気 抵抗率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
室温	要求特性	≥ 800	≥ 1000	≥ 25	≥ 95
	巻 線 取付軸	A	954	1159	60
		B	918	1149	71
		C	919	1134	71
		D	926	1139	71
		E	930	1128	76
4 K	溶接金属部	872	1137	60	116
	要求特性	≥ 1000	≥ 1400	≥ 25	≥ 90
	巻 線 取付軸	A	1176	1556	63
		B	1153	1551	72
	溶接金属部	1100	1585	58	103

4. ま と め

以上のように著者らが開発した超電導発電機回転子用 Ni 基超合金と大型化製造技術は超速応型超電導発電機としては世界最大の70 MW 容量の回転子を製造可能にした画期的なものであり、今後、超電導発電機の実用化に向けて大きな前進につながるものである。なお、本研究は通産省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託により、超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)の研究テーマとして実施したものである。

文 献

- (1) R. G. Thompson: J. Metals, July, (1988), 44.
- (2) H. L. Eiselstein: Metals Engineering Quarterly, (1971), 20.
- (3) O. Matsumoto, M. Kohno, T. Honjo, M. Okamura, K. Hattori, Y. Tsuda and N. Suzuki: Adv. Cryog. Eng., **40**(1994), 1331.
- (4) N. Suzuki, T. Murakami, K. Suzuki, S. Asai, M. Tanaka and Y. Kobayashi: Adv. Cryog. Eng., **38**(1992), 61.
- (5) K. Miyaike, M. Inukai, T. Kitajima, T. Aiba, T. Matsuda, Y. Tsuda, N. Suzuki and Y. Kobayashi: Proceedings of ICOPE-93, Vol. 1 (1993), 309.