

連携記事

地熱発電用鋼管に求められる性能

Required Performance on Steel Pipes for Geothermal Power Generation

JFEスチール(株)
知多製造所 商品技術部
第1商品技術室 室長

藤澤宏太郎
Kotaro Fujisawa

JFEスチール(株)
知多製造所 商品技術部
第1商品技術室

大岩慎也
Shinya Oiwa

1 はじめに

地球温暖化抑止は世界共通の重要課題であり、温暖化の原因である二酸化炭素(CO₂)の排出量を減らすため、政府は2020年10月に、「2050年までに、温室効果ガスの排出量を全体としてゼロにする」カーボンニュートラルを目指すことを宣言した。その政策の一つとして重要なのが再生可能エネルギー比率の拡大である。2021年10月に示された政府の第6次エネルギー基本計画¹⁾では、図1のように2030年度の野心的な電源構成として再生可能エネルギーの比率を36~38%程度と見込んでいる²⁾。地熱発電は安定して発電できる純国産電力として注目されており、2019年度の電源構成比率0.3%から2030年度の1%まで3倍に拡大するために地熱開発の加速化に向けた各施策や高深度の超臨界状態の熱水資源を活用した大規模地熱発電を可能とする技術開発が進められている。

地熱発電の概要³⁾を図2に示す。地中には、地下1,000mから3,000mに地熱貯留層が存在し、地表から浸透した雨水などが地熱により加熱され、200℃から300℃の高温の熱水と

して蓄えられている。我が国の地熱発電の主流方式である、蒸気・熱水を地上に取り出し、気水分離器で蒸気のみを分離し、分離された蒸気をタービンに噴射することで発電機を回し発電するシングルフラッシュ方式の地熱発電では、地熱貯留層に生産井と還元井を掘削し、生産井から高温高压の蒸気・熱水を地上に取り出し、熱水は還元井を通して再び地中深くに戻される。この他に熱水から追加で低压蒸気を取り出して発電するダブルフラッシュ方式や、低沸点の二次媒体で発電するバイナリー方式などがあり、いずれも蒸気・熱水の生産、発電後の熱水の地下への還元を使用される鋼管として、石油や天然ガスの生産に使用する鋼管である油井管が使用される。

本報では、地熱開発の加速化に際して地熱発電用鋼管に求められる性能を、材料・ねじの観点から、使用環境に着目して考察する。

2 材料への要求

地下に蓄えられている熱水はpHがほぼ7の中性的の場合と硫酸イオン(SO₄²⁻)を多く含みpHが3程度の酸性の場合

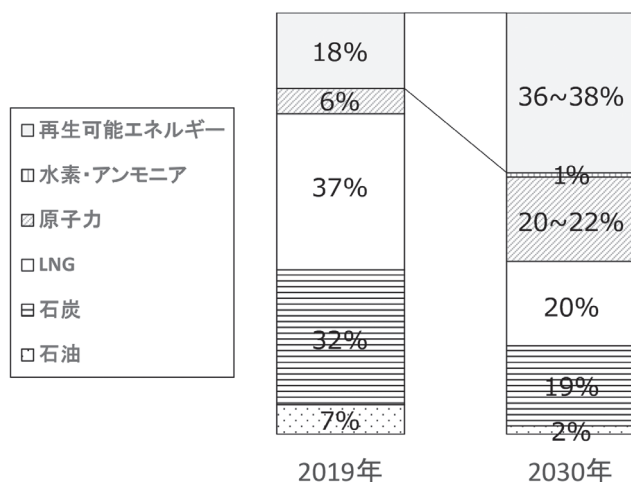


図1 第6次エネルギー基本計画における野心的な電源構成²⁾

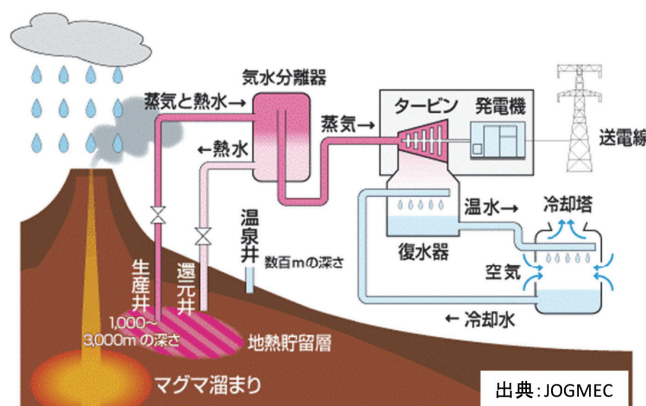


図2 地熱発電の概要³⁾ (Online version in color.)

合がある。酸性井の場合は、生産井・還元井用の鋼管や蒸気・熱水配管、発電タービン等の設備に高耐食性材料が必要となるため、従来の地熱発電ではコストを低減して収益性を確保するために中性井が優先的に開発されてきた。中性井の開発では、アメリカ石油協会で規格化されたAPI 5CT J55, K55といった炭素鋼が主に使用されている。地熱発電に用いられる生産井・還元井の一般的な井戸デザインを図3に示す。外側から外径20インチ (508.00mm)、13-3/8インチ (339.72mm)、9-5/8インチ (244.48mm)、7インチ (177.80mm) のケーシングパイプが使用される。各パイプの接続はねじ継手で行われ、ケーシングの外側はセメントで固められる。石油や天然ガスの場合は、ケーシングの内側に挿入されたさらに細いチュービングの中を通して生産が行われるが、地熱発電の場合、チュービングは用いられない。

2030年度に地熱発電の比率を1%に引き上げるためには、現状の設備容量を約3倍に拡大する必要があり、そのためには中性井だけでなくより厳しい環境の酸性井の開発が不可欠になると考えられる。表1に井戸環境と使用される鋼管の組み合わせを示す。中性井の場合は、ステンレス鋼であれば腐食速度は極めて小さいが、炭素鋼であっても想定使用期間に対して問題とならないほど腐食速度が小さいため、安価な炭素鋼が使用される。一方、高温で低pHの酸性井の環境下では、炭素鋼では想定使用期間よりも圧倒的に短い時間で腐食が進んでしまうため、ステンレス鋼を使用する必要がある。

図4に同じ酸性環境に晒されて1年経過した炭素鋼 (API

5CT K55) と13% Crステンレス鋼 (API 5CT L80-13CR) のパイプの内表面の違いを示す。温度は120℃, pHは3.83、塩化物イオン濃度は1,000ppmである。炭素鋼の場合、パイプ内面全体が激しく腐食しているが、13% Crステンレス鋼の場合は腐食の発生は観察されない。以下にステンレス鋼の耐食性メカニズムを示す。図5のようにステンレス鋼の表面には不動態被膜と呼ばれる厚さ数nmの非常に薄く緻密なクロムの酸化物/水酸化物の被膜が存在する⁴⁾。この被膜が保護

表1 井戸環境と使用される鋼管の材質の組み合わせ
(Online version in color.)

	鋼管の材質	
井戸環境	炭素鋼	ステンレス鋼
中性井	○ 腐食速度 小	× 腐食速度 極小 コスト 高
酸性井	× 腐食速度 大	○ 腐食速度 小

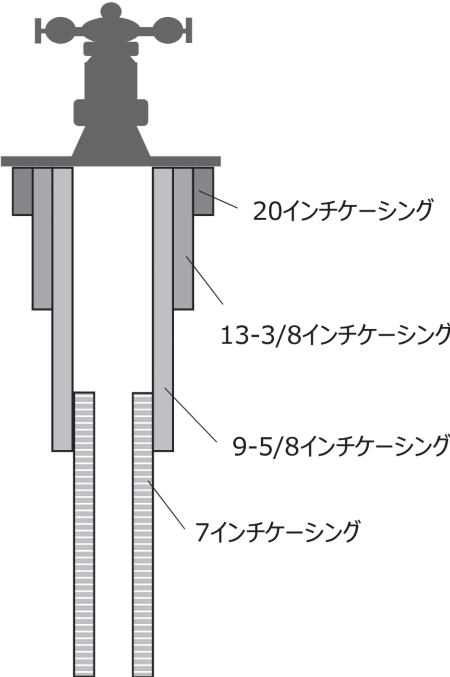


図3 地熱発電の一般的な井戸デザイン

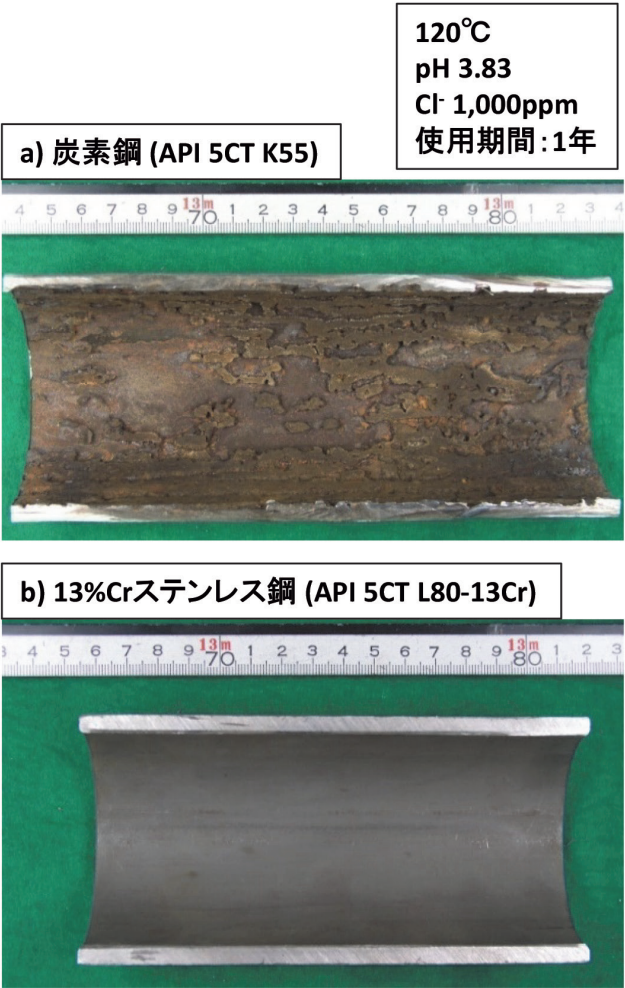


図4 使用後のパイプ内面比較 (Online version in color.)

皮膜として機能し、酸性環境下における鉄の腐食反応であるアノード反応 ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) の進行を阻害する。このため、炭素鋼が全面腐食を起こす条件下でもステンレス鋼の腐食は大幅に抑制され、想定使用期間を通して問題なく使用可能となる。ステンレス鋼の不動態被膜は人為的に施したコーティング被膜ではないため、物理的な損傷により一時的に母材が露出したとしても即座にステンレス鋼中のクロムが大気中の酸素、水と反応して不動態被膜を再生する自己修復性を持っている。溶液中に含まれる塩化物イオンは不動態被膜を破壊することで耐食性に悪影響を及ぼすので、その濃度は耐食性にとって重要な因子である。

図6に地熱発電で想定される酸性井での各種ステンレス鋼の腐食速度を調査した結果を示す。想定される環境として温度は300℃、pHは3.0とした。塩化物イオン濃度は、地熱井では数千ppmであることが多いことから10,000ppmとした。被験材はL80-13Cr (13 % Cr), JFE-HP2-13CR-95M (13 % Cr-5 % Ni-2 % Mo, UNS S41426), JFE-UHP™-15CR-125 (15 % Cr-6 % Ni-2 % Mo-Cu, UNS S42625), JFE-UHP™-17CR-110 (17 % Cr-4 % Ni-2.5 % Mo-W-Cu, UNS S42825) である。JFE規格の末尾の数字はksi (キロポンド毎平方インチ) 単位での降伏強度の下限値を示す (1ksi = 6.89476MPa)。合金成分が多くなるほど耐食性は向上するが、温度300℃、pH 3.0の酸性井の環境ではL80-13Cr, JFE-HP2-13CR-95M, JFE-UHP™-15CR-125は腐食速度が適用可否判断の目安である0.127mm/年 (0.005インチ/年) を超えるため、使用には適さない。この0.127mm/年 (0.005インチ/年) は腐食速度測定値の解釈のガイドライン⁵⁾においてModerateとHighの分類の境界とされている値である。一方、JFE-UHP™-17CR-110の腐食速度は0.094mm/年と適用可否判断の目安を下回るため、使用に耐え得ることがわかる。22 % Cr, 25 % Crといった、より高合金の材料であれば腐食速

度は更に小さくなるが、経済性の観点からはJFE-UHP™-17CR-110が優れた材料であると言える。実際に酸性井でJFE-UHP™-17CR-110が採用された事例として、海外のある地熱井の条件を表2に示す。温度300℃、pH 3.4の酸性井である。生産時の高温の井戸底を模擬した腐食試験、休止時の常温の井戸元を模擬した腐食試験、生産中の井戸元からの蒸

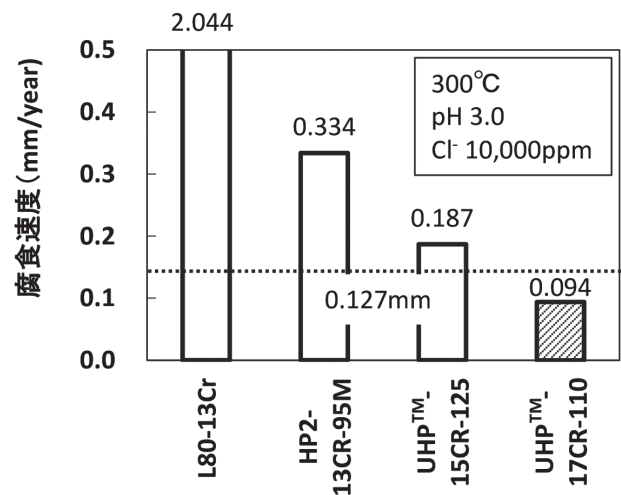


図6 酸性井模擬環境での腐食速度比較

表2 UHP-17CR™-110が適用された井戸環境
(Online version in color.)

	井戸底 (生産時)	井戸元 (休止時)
温度	300℃	25℃
pH	3.4	3.2
Cl⁻	7,000ppm	7,000ppm

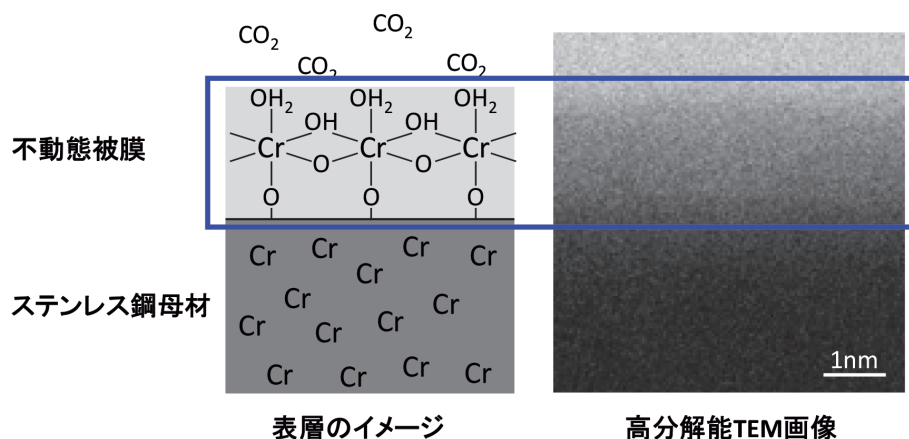
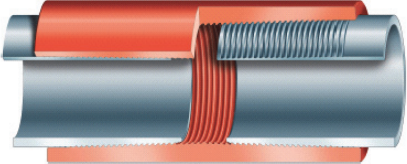
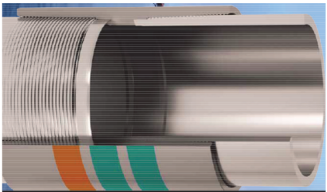


図5 ステンレス鋼の表層構造 (Online version in color.)

表3 APIバットレスねじと特殊ねじの比較 (Online version in color.)

		APIバットレスねじ	特殊ねじ
構造		 出典: GEOCONNカタログ ⁷⁾ カップリング 中央部に段差あり	 シール部 カップリング 中央部に段差なし
シール機構		ねじ+コンパウンド(潤滑剤)	シール部のメタル-メタル接触
特徴	気密性	低	高
	浸食発生	大	小
	析出物の堆積	大	小
	接続生産性	高	低

気・熱水配管内に試験片を装入したフィールドクーポン試験を行った結果、腐食減量が規定内で、かつ割れが無いことが確認されたため採用に至った。

以上のように地熱発電の生産井・還元井に用いられる鋼管の材料選定では、高温の熱水による腐食が非常に重要なポイントとなる。中性井では炭素鋼でも問題なく適用可能であるが、酸性井ではステンレス鋼の使用が必要となる。温度300℃、pH 3.0、塩化物イオン濃度 10,000ppm の環境では耐食性と経済性の両立の観点から JFE-UHP™-17CR-110 が最適な材料であると言える。

3 ねじへの要求

地熱発電に用いられる生産井・還元井の鋼管（ケーシング）同士はねじ継手によって接続される。ねじ継手にはAPIの規格で規定されたAPIねじ⁶⁾と、引張、圧縮、内圧、外圧、曲げ等の複合した応力下でも気密性を維持するために各メーカーが独自に開発した特殊ねじがある。ケーシングは外側をセメントで固められているため、高温の蒸気により加熱されて膨張する操業中は圧縮応力が働き、操業を一時的に止めて温度が下がって収縮すると引張応力が働く。この圧縮応力、引張応力によって、正しく締め付けられた位置から一山分、ねじ山を飛び越える現象が起り得るため、APIねじの中でねじ山形状が台形であるバットレスねじが一般的に使用される。

表3にAPIバットレスねじと、JFEスチールのJFELIONを例とした特殊ねじとの比較を示す。いずれも外ねじを切削し

たパイプ管端と内ねじを切削したカップリングと呼ばれる継手によって接続される。バットレスねじの場合はコンパウンドと呼ばれる潤滑剤とねじ同士の接触によって気密性を持たせるが、特殊ねじの場合はねじとは独立したシール部がメタル-メタル接触することでより高い気密性を有している。カップリング中央部に着目すると、バットレスねじの場合は段差があり、蒸気・熱水の輸送中に乱流が発生しエロージョンと呼ばれる浸食が発生しやすくなる。一方、特殊ねじの場合は段差が無いいため、乱流が発生しにくく、エロージョンが起りにくい。また、バットレスねじの段差部に地下から汲み上げられたシリカ等の析出物が堆積し、ケーシングの内径を狭めて生産効率が低下することが起り得るが、特殊ねじの場合は段差が無いため析出物の堆積は起りにくく、生産効率が維持される。このように性能面ではバットレスねじよりも特殊ねじが優れるが、管同士を接続する際の生産性ではバットレスねじが優位である。これはバットレスねじの場合は締め付け長さのみの管理であるのに対して特殊ねじでは締め付けの回転数とトルクを管理するため、回転速度を低速にする必要があるためである。

電源構成における地熱発電の比率を2019年度の0.3%から2030年度に1%に引き上げるためには、より厳しい環境の酸性井の開発が不可欠になると考えられ、材料面では耐食性が必要になると述べたが、ねじの面では特殊ねじの要求が増えてくると予想される。酸性井にバットレスねじを適用した場合、カップリング中央の段差部の乱流によるエロージョンと酸性の蒸気・熱水による腐食が複合して発生するエロージョ

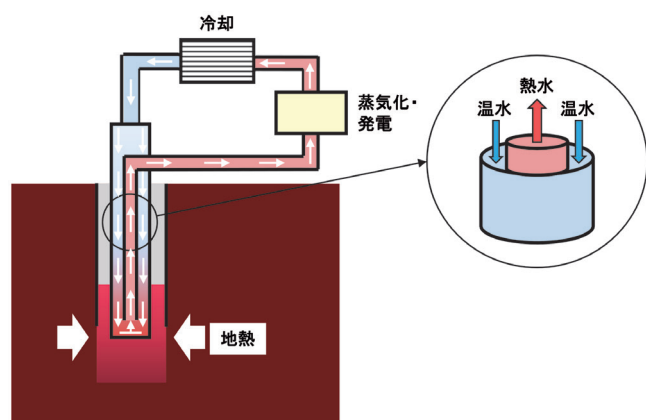


図7 新地熱発電システムの概要 (Online version in color.)

ン・コロージョンによってカップリング中央部が著しく減肉する可能性があるが、内面に段差の無い特殊ねじを使用することでこのエロージョン・コロージョンを防止することができる。また、地下に存在する蒸気・熱水を汲み上げて発電に使用する従来の地熱発電方式に加えて、図7のように地中の高温域に密閉された二重構造の銅管を埋め込み、地上から注入した水や超臨界CO₂を地熱により加熱し、その熱を利用してタービンを回し発電を行う新しい地熱発電システムも開発されている⁸⁾。この方式であれば従来の地熱発電での課題であった長期間に渡る事業性調査や、蒸気・熱水の枯渇等の種々の問題を解決し、安定した地熱発電を行うことができるが、効率良く水や超臨界CO₂を循環するためには注入する水や超臨界CO₂、発生した蒸気・熱水が漏れ出ないことが重要であり、気密性の高い特殊ねじが採用される機会が多くなると想定される。

なお、石油・天然ガス生産用途のねじの気密性評価方法はAPI RP 5C5やISO 13679で規定されているが、地熱発電や蒸気圧入用途の高温でのねじの気密性評価はISO/PAS 12835で規格化されている。特殊ねじの例として示したJFELIONは外径13-3/8インチと9-5/8インチで、最高温度290℃のISO/PAS12835に準拠した試験で合格した実績を持ち、JFE-UHP™-17CR-110が採用された案件でも使用されている。

4 おわりに

従来、地熱発電に用いられる生産井・還元井では、炭素鋼油井管とAPIバットレスねじの組み合わせで使用されるのが一般的であった。カーボンニュートラルに向けた地熱発電容量の拡大のためにはより厳しい環境の開発、新しい地熱発電方式の拡大も必要になるため、使用環境に応じてJFE-UHP™-17CR-110を例としたステンレス鋼、JFELIONを例とした特殊ねじの採用が拡大していくと予想される。

参考文献

- 1) 経済産業省：第6次エネルギー基本計画, <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>, (accessed 2022-5-30).
- 2) 経済産業省：エネルギー基本計画の概要, <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-2.pdf>, (accessed 2022-5-30). の表をグラフ化
- 3) 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC): 地熱発電のしくみ, <https://geothermal.jogmec.go.jp/information/geothermal/mechanism/mechanism2.html>, (accessed 2022-6-1).
- 4) E.Hamada, K.Yamada, M.Nagoshi, N.Makiishi, K.Sato, T.Ishii, K.Fukuda, S.Ishikawa and T.Ujiro : Corrosion Science, 52 (2010), 3851.
- 5) NACE SP0775-2018
- 6) API Specification 5B, 16th edition, December 2017, (Errata 1, June 2018, Errata 2, November 2018, Addendum 1, December 2018, Addendum 2, November 2019, Addendum 3, January 2021).
- 7) (株)メタルワン: GEOCONNカタログ, https://www.mo-tc.com/wp-content/themes/motc/pdfs/catalogues/GEOCONN_SERIES.pdf, (accessed 2022-6-6).
- 8) B.Higgins, J.Muir, J.Scherer and A.Amaya : Geothermal Resources Council Transactions, 43 (2019), 434.

(2022年7月22日受付)