

## 地熱流体による金属材料損傷機構に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16263">http://hdl.handle.net/2297/16263</a>

氏名	真田 徳雄
生年月日	
本籍	宮城県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第324号
学位授与の日付	平成11年9月30日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	地熱流体による金属材料損傷機構に関する研究
論文審査委員(主査)	木村 繁男(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	放生 明廣(工学部・教授) 岡島 厚(工学部・教授) 黒部 利次(研究科・教授) 上田 隆司(工学部・教授)

## 学位論文要旨

### Summary:

This study was done on the mechanism of materials corrosion which occurred in flowing single- and two-phase fluids of geothermal wells and pipelines. In the first, droplets and steam in a two-phase jet flow were observed using a particle dynamics anemometer and micro-moment photography, and a large number of damage pits on a alloy specimen target in the jet flow were examined. It was found that erosion by droplet impingement was a significant mechanism in the case of combined erosion-corrosion in the jet flow even if the mass loss due to corrosion was small in the static liquid without droplet attack. In the second, materials erosion-corrosion was evaluated in flowing fluid from geothermal wells with velocity in the range of 0 ~ 100m/s. The results demonstrated that the effects of the flow turbulence on corrosion increased as the pH decreased, and as the temperature increased, and that the corrosion was further increased due to turbulence in an expanding flow situation. In the third, the Drift-Flux Model, which might be valuable for estimating environments around geothermal wellbore-casing materials, was applied for simulating two-phase flows in the wellbore. The calculated results by the Model method were compared with those simulated by conventional homogeneous flow models. It was found that the method could calculate void fractions in two-phase flow wellbore system without any significant empirical relation, and so the method is found to be applicable to the flow simulation for geothermal wellbore for estimating the environments.

### 1. まえがき

我が国において、輸入に頼っている石油に替わる国産エネルギーの開発促進が図られてきた中で、石油など化石燃料を使う火力発電に比べて、炭酸ガス排出量が20分の1以下と見積もられている純国産の地熱発電は、クリーンで再生可能エネルギーとして、今後の展開が期待される。しかしそのために解決しなければならない重要な課題の一つが発電設備に生じる材料損傷問題である。すなわち、高温・高速の蒸気熱水二相流が流動する地熱坑井ケーシング管、地上流送管などにおいて材料損傷が生じると生産性を大きく低下させる。特に二相流が酸性流体の場合、従来材料では損傷が激しいための確な材料選定指針を示す必要がある。そのためには、気液二相地熱流体による金属材料損傷機構を明らかにしなければならない。

本研究では最初に、地熱流体による実際の材料損傷状況を整理した。次に、気液二相流中における気液比の違いによって変化する液滴挙動と流動様式が、材料損傷にどのように影響するかを明らかにした。それらにもとずいて、腐食性二相流体の流動によって加速される金属材料の損傷機構を明らかにした。さらに材料使用環境条件を予測するための二相流解析法を究明した。

### 2. 地熱流体の流動条件と材料損傷状況

第1章では、第2章と第3章で議論する坑井ケーシング管、地上流送管における地熱流体の流動条件を整理すると共に、これまで実際に経験しているケーシング管、地上流送管の材料損傷状況を整理して記

述した。

- (1) 国内で掘られた地熱坑井のうち最も深いのは、地表から3,729mに達する坑井で、その坑底では500°Cを記録している。しかし多くの場合、数100mから3,000mの深さがほとんどで、それらの坑底温度は350°Cくらいまでである。その流体性状はアルカリ性から酸性まで多様である。
- (2) 地熱流体が地上に噴出するときの流動条件は、流速が数10m/s～100m/s、温度が100数10°C～200°C、圧力が数気圧～10数気圧で運転されることが多い。気液比は坑井によって異なり、噴出流体のほとんどが蒸気の場合から、蒸気と熱水の質量流量比で1対6と熱水の割合が大きい場合まで様々である。
- (3) 坑井ケーシングと地上流送系において、これまで経験している材料損傷発生件数のうち、腐食とエロージョン・コロージョンの件数が多く、両者を合わせると全損傷件数の2/3を越えている。

### 3. 気液二相流の流動状態

気液二相流管内の液滴挙動や管壁上の液膜状態によって、管壁の損傷形態が大きく変わる。そこで第2章では、気液比の違いによって変化する、気液二相流中の液滴直径、液滴分布、そして液滴速度を、レーザ流速計を拡張した粒子流動測定装置を用いて測定し解析した。さらに気液比の違いによって変化する流送管壁面上の液膜状態を、シャドウグラフ法により写真観測して明らかにした。

- (1) 二相流混合流速が $u_m=178\text{m/s}$ で液相容積流量比が $\beta=1\times 10^{-6}\sim 3200\times 10^{-6}$ の場合、液滴平均速度 $u_x$ は135m/sで、 $u_m$ と $u_x$ の差は42m/sであった。このとき液滴直径 $D_m$ の観測値は $\beta$ と共に緩やかに増加した( $\beta=0.5\times 10^{-5}$ のとき $D_m=40\mu\text{m}$ 、 $\beta=4\times 10^{-5}$ のとき $D_m=48\mu\text{m}$ )。また $\beta=2\times 10^{-4}$ のとき $D_m=55\mu\text{m}$ 、 $\beta=2\times 10^{-3}$ のとき $D_m=68\mu\text{m}$ などの値が算出された。
- (2)  $\beta=0\sim 56\times 10^{-4}$ の範囲における二相流の流動様式は、 $\beta=3\times 10^{-4}$ までは波状流で、 $\beta$ がそれより大きくなると環状流と推測された。

### 4. 材料損傷に及ぼすの気液比の影響

第2章ではさらに、材料損傷と気液比の関係を明らかにした。

- (1) 噴流が試験片に垂直に衝突する場合について、試験片の質量損傷量 $ML$ と流れのパラメータとの関係を詳細に測定した。アルミニウム試験片の場合、液相容積流量比 $\beta=0.002$ のとき、試験片表面に形成されたピットの平均直径、平均深さが最も大きく $ML$ が最も大きかった。特にこの場合、全損傷量に占める液滴衝突(物理的作用)に起因する損傷量が45%、流体腐食(化学的作用)による損傷が5%、そして物理的作用と化学的作用の相互作用による損傷量が55%であった。
- (2) 噴流の主方向と試験片表面の方向が平行な場合、流体性状が中性またはアルカリ性であれば、炭素鋼の損傷量 $ML$ は容積流量比 $\beta$  ( $0<\beta<0.0056$ )に比例して増加した。
- (3) 噴流の主方向と試験片表面の方向が平行な場合、流体性状が酸性であれば、液相の質量流量比 $X$  ( $0.25<X<0.8$ )の増加にたいして、炭素鋼の質量損傷量 $ML$ は指数関数的に増大した。すなわち炭素鋼の場合、 $ML$ と $X$ との関係は次の簡単な式で表せた。

$$ML = a \cdot 10^{bX} \quad (a, b: \text{定数})$$

- (4) 容積流量比 $\beta$  ( $0<\beta<0.0056$ )の範囲で、流動様式が波状流から環状流に変化したか、(2)、(3)に示すように、液相の容積流量比 $\beta$ または質量流量比 $X$ と損傷量 $ML$ との間に、簡単な関係を見いだすことが出来た。

### 5. 地熱流体による材料損傷と流速の関係

第3章では、実際の地熱水に特有な材料損傷の把握と、材料損傷が流動条件によってどのように加速されるかを明らかにした。

- (1) 溶存酸素を含むアルカリ性地熱水における炭素鋼の損傷速度 $CR$ は、流速 $u_f=0.1\text{m/s}$ において最大となり、さらに流速を増すと、 $u_f=0.1\sim 0.5\text{m/s}$ の範囲で減少し、 $u_f=0.5\sim 4.1\text{m/s}$ の範囲ではほぼ一定であった。
- (2) 溶存酸素を含むアルカリ性地熱水におけるステンレス鋼の損傷速度 $CR$ は非常に小さく( $CR<0.05\text{mm/year}$ )、流速の影響もほとんど現れなかった。
- (3) 酸性地熱水における炭素鋼及びステンレス鋼の損傷速度 $CR$ は、 $u_f=0\sim 0.5\text{m/s}$ では流速と共に増加したが、 $u_f=0.5\sim 4.1\text{m/s}$ ではほぼ一定だった。ただしステンレス鋼の $CR$ は炭素鋼の $CR$ に比べて十分小さかった。

第3章ではさらに、坑井ケーシング内流体の高流速を想定して、広範囲の流速条件下 ( $u = 0 \sim 100$  m/s) における材料損傷に及ぼすpH値、温度、そして流れの乱れの影響を明らかにした。

(1)材料損傷速度CRと流速との関係をモデル化することが出来た。特に、CRは $u = \text{数m/s} \sim 100\text{m/s}$ でほぼ一定であった。

(2)酸性地熱流体による金属材料損傷に及ぼす流速の影響を、静止流体による損傷との比較で示すことが出来た。

(3)損傷速度CRはpHが低下すると大きくなり、その傾向は温度が高いほど大きかった。

## 6. 坑井内二相流の解析

坑井ケーシング管材料の損傷評価を的確に行うためには、坑井内の流動特性を正確に握る必要がある。しかし、その流動規模の大きさと、気相と液相とが入り交じっているという二相流の複雑さのため、地熱生産坑井の全長にわたって正確に測定することは容易でない。そのために現状では、数値解析による坑井内の流動状態把握が不可欠である。第4章では、ドリフトフラックスモデルを用いて坑井内気液二相流を数値解析した。

(1)地熱坑井内流動にたいするドリフトフラックスモデルによる数値解析は、従来の均質流モデル(ノンスリップモデル、Smithの式)のようにスリップ比や均質混合相中の液流量比を限定せずに、坑井内の温度、圧力、気相速度、液相速度、ボイド率を計算できることを確認した。

(2)ドリフトフラックスモデルによる解析例として、2000mの生産井において坑底温度が異なる場合(260°Cまたは、280°C、300°C)を想定して流動解析した。その結果、坑口で得られるボイド率、各相の速度差などについて、従来法に比べてより深い理解を得ることが出来た。

(3)以上のことから、ドリフトフラックスモデルが坑井内における地熱流体の流動解析に有効であることを確認した。

## 7. まとめ

本研究では、地熱生産坑井および地上流送管を想定して、腐食性二相流体の流動によって加速される金属材料の損傷機構とそれらの使用限界を明らかにするとともに、金属材料損傷に直接関わる坑井内流動現象をより良く表現できる二相流解析法を究明した。この研究成果により、地熱環境で使用される金属材料の損傷量を、流体の性状、流速等により、あらかじめ予測することが出来るようになった。

## 学位論文審査結果の要旨

平成11年7月26日、8月3日第1、2回学位論文審査委員会を開催し、8月3日口頭発表を行い、同日最終審査委員会を開催した。協議の結果、以下の通り判定した。申請者は、昭和43年3月、室蘭工業大学工学部産業機械工学科を卒業し、平成10年4月、通商産業省工業技術院東北工業技術研究所から本研究科システム創成科学専攻に社会人入学した。申請論文は、高温・高圧の2相状態で存在する地熱流体が材料の劣化・損傷に及ぼす影響と損傷の機構を解明し、地熱流体の性状(酸性度)に適した金属材料の選択についての指針を得ることを目的としている。そのため、(a)気液2相流発生装置を用いた室内実験による金属材料損傷に及ぼす気液比の影響、(b)実際の地熱流体を用いた金属材料損傷に及ぼす流速の影響、(c)坑井内2相流解析におけるドリフトフラックスモデルの適用に関して基礎実験及び理論解析を行っている。すなわち、室内実験により、衝突噴流と平行流に対する金属材料損傷機構の違いを明らかにし、同時に損傷量を予測するための簡便な方法を提案した。さらに、実際の地熱流体を利用した各種材料の損傷試験を実施し、室内実験により得られた損傷量予測手法の妥当性と限界を確立した。このように本研究では地熱開発に関連して、金属材料の選定を行う上での多くの有用な知見を得ることができた。

以上、申請論文は、地熱流体による損傷機構の解明を行い、熱水の性状や流動条件から金属材料損傷量を予測する簡便な評価方法を見出し、提案したことは、この分野の基盤及び研究開発に資するところ大であり、博士(工学)論文として値するものと認定する。