

2021年度成果報告会

分野:地熱

地熱発電技術研究開発／地熱エネルギーの高度利用  
化に係る技術開発／未利用地熱エネルギーの活用に  
向けた技術開発(在来型地熱資源における未利用酸  
性熱水活用技術の開発)

地熱技術開発(株)  
(国研)産業技術総合研究所  
エヌケーケーシームレス鋼管(株)  
(国)京都大学

問い合わせ先  
地熱技術開発(株) 佐藤 真丈  
E-mail: msato@gerd.co.jp  
TEL: 03-5541-9072

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2018年7月  
終了 : 2021年2月

## 2. 最終目標

地熱開発事業者が酸性熱水を地熱資源として活用する上で必要となる情報を提供できるシステムを開発する。

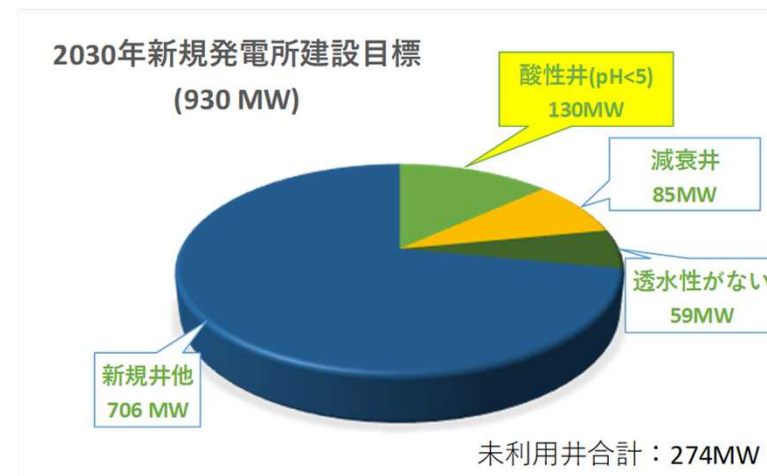
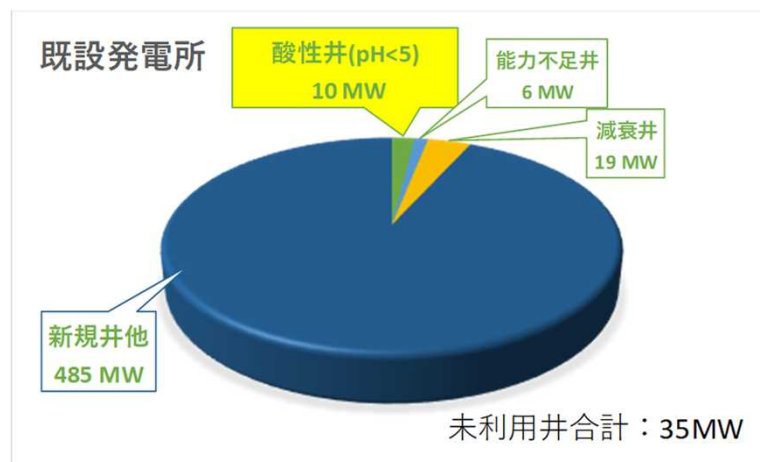
- ◆ 最適材料選定に係る技術開発
- ◆ 薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発
- ◆ 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムの開発

## 3. 成果概要

- 高温・低pH環境での材料腐食試験を基にした腐食予測式・材料選定チャートを開発。腐食速度予測技術, 腐食に係る論文データベース, 経済性試算, ならびに, 腐食速度データ表示機能を開発し, プラントリスク評価システムとして統合化を完了した。
- 昨年度選定したインヒビターに対し、高温(200℃)、低pH(pH3.0)での性能評価を実施。炭素鋼に対し、隙間部での腐食が確認されたが、金属表面に対する防食効果を確認した。
- 流れ場による壁面剪断応力を用いる予測式を格子ボルツマン法による巨視的シミュレーションにより、オリフィス配管の局所的な減肉、エルボ一部前後に局所的な減肉を再現した。また、配管内でスケール成長させるシミュレーションを行った結果、エルボ一部の下流側で腐食を補うようにスケールが付着することを確認した。更に、絶対時間をシミュレーションに組み込む技術確立した。

## 背景と課題

- ◆ 地熱発電量増大に向け、高温の発電ポテンシャルの高い貯留層の開発が望まれるが、火山近傍域は同時に高温酸性流体の賦存可能性が高く、リスクの高さから高温・低pH環境での材料腐食試験はあまり行われていない。
- ◆ 「酸性熱水の対策技術等に関する調査研究」(NEDO, 1992)では、高温熱水対流型資源のうち、13.3%(アンケート)が酸性である可能性が指摘されており、2030年度新規発電所建設目標(930MW)に対して130MWの規模となる。



酸性熱水噴出坑井数のアンケート結果である13.3%を基にしたポテンシャル( NEDO,1992)

# 目的

## 【背景】生産流体が酸性の場合

酸性熱水は全体の1割程度存在するが...



酸性熱水対策の情報が少ない

耐腐食性材料は高価格



多くの場合、利用を断念



(Fadli et al., 2015)

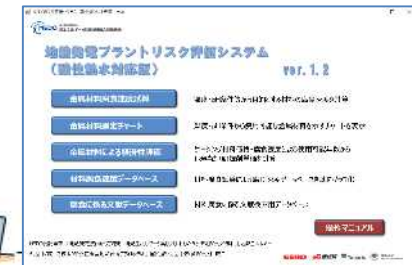


## 【本事業の目的】酸性熱水活用の促進

### ■ 酸性熱水の利用検討へ踏み出すための足掛かりとなる情報ツールの開発

- 熱水性状での材料腐食速度データ
- 金属材料コスト・経済性データ
- 関係論文情報の入手

利用可能性の初期検討に活用



↑ 反映

### 最適材料選定に係る技術開発(要素技術)

過去の腐食試験データの活用

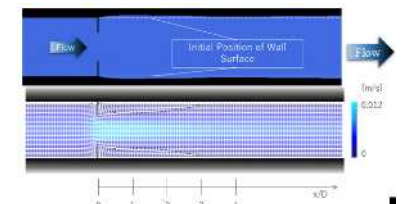
新規材料の腐食試験データ

腐食速度予測・経済性評価

### ■ 具体的な腐食リスク箇所を把握するための物理シミュレーション技術の開発

- 配管減肉減少を剪断応力と流れ加速型腐食により再現
- 格子ボルツマン法による解析

耐腐食材料を要する箇所や、要補強箇所の予察に活用



オフィスでの腐食箇所の再現

# 研究開発項目・実施内容

## I.酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発

### ① 酸性熱水に対応したリスク評価システム開発(地熱技術開発)

- ・ II 最適材料選定に係る技術開発成果である腐食速度予測技術をベースに, 経済性評価, 論文データベース, 腐食速度データのグラフ表示機能の各モジュール開発およびソフトウェア化。

## II.最適材料選定に係る技術開発

### ② 既存金属材料に係る腐食データベースの整備(産総研, 地熱技術開発)

- ・ 腐食に係る論文データベースの作成
- ・ Cr当量による腐食速度予測式の改良。

### ③ 高温・低pH環境における金属材料腐食試験(地熱技術開発, 産総研, エヌケーケーシームレス鋼管)

- ・ 熱水フロー式金属材料腐食試験装置による高温, 低pHでの腐食速度データ取得。
- ・ 米国ガイザーズでの実坑井試験による露点腐食データの取得。

### ④ 高温・低pH環境下における既存材料選定の研究(エヌケーケーシームレス鋼管)

- ・ 高温, 低pHでの腐食速度データ実測値に基づく腐食速度予測式の開発

## 研究開発項目・実施内容(続き)

### Ⅲ.薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発

#### ⑤ 酸性熱水に係る対策技術調査(地熱技術開発)

- ・ スクリーニング調査による有望な腐食防止インヒビターの選定。
- ・ 選定したインヒビターの高温での性能評価。

#### ⑥ 実坑井試験によるインヒビターの腐食防止効果の検証(地熱技術開発, 産総研, エヌケーケーシームレス鋼管)

- ・ “フロー式ポータブル材料腐食試験装置”を用いたインヒビター性能評価に係る実証試験の実施, データ取得。

#### ⑦ 腐食シミュレーションによる予測技術の開発(京都大学, 地熱技術開発)

- ・ 流れ場による壁面剪断応力を用いる予測式を格子ボルツマン法による巨視的シミュレーションを適用し, 実際の腐食やスケール成長のデータを活かす技術を開発。

# 研究開発スケジュール

研究開発項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
I. 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発												
① 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発		概念設計			基本設計				システム統合・動作検証			
II. 最適材料選定に係る技術開発												
② 既存金属材料に係る腐食データベースの開発		データベース整備、Cr当量腐食速度予測式改良										
③ 高温・低pH環境における金属材料腐食試験		準備	フロー式腐食試験・過熱蒸気井試験・分析評価									
④ 高温・低pH環境下における既存材料選定の研究					腐食速度予測式改良							
III. 薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発												
⑤ 酸性熱水に係る対策技術に係る調査		対策技術調査 インヒビター（スクリーニング）			対策技術調査 インヒビター（高温試験）				試験結果まとめ			
⑥ 実坑井試験によるインヒビターの腐食防止効果の検証		試験準備（装置改良・地点選定）							実坑井試験・分析評価			
⑦ 腐食シミュレーションによる予測技術の開発		予測技術の開発			エルボ一部での検証 スケール成長予測				実坑井試験による検証			
検討委員会		▼		▼		▼		▼				▼



## 【開発成果】 最適材料選定に係る技術開発(開発項目③)

### ■ 開発目標

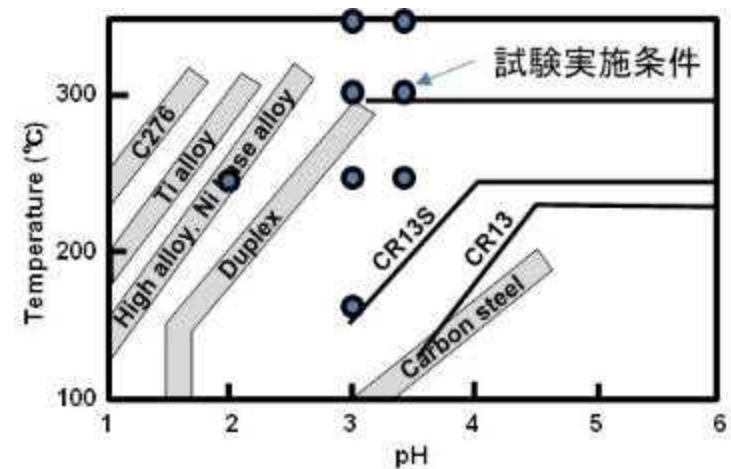
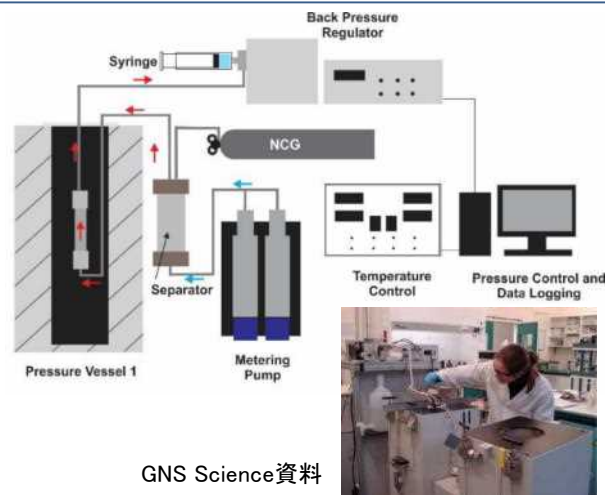
高温・低pH環境での材料腐食試験データを取得し、これらをベースとした腐食速度予測式を開発する。また、同データを基にした材料選定チャートを開発する。

### ■ 試験方法

- 暴露試験の経過に伴う熱水pHの上昇を伴うバッチ式ではなく、模擬熱水を連続的に通水するフロー式腐食試験装置での腐食試験を実施。
- 産業技術総合研究所にて腐食試験片の腐食生成物の除去、重量測定、SEM-EDX、X線回折、ピットイング解析を実施し、高温・低pHでの腐食量データを取得。

### ■ 試験条件

- 13Cr, Super13Cr, 17Cr
- 温度 150, 250, 300, 350℃
- pH: 2, 3, 3.5
- Cl<sup>-</sup> (Salinity) : 10,000ppm
- NCG in steam (Vol%): 3%
- CO<sub>2</sub> in NCG (Vol%): 96 %
- H<sub>2</sub>S in NCG (Vol%): 4%





## Ⅱ．最適材料選定に係る技術開発(開発項目③)

### ■ 過熱蒸気井での腐食試験

将来的に高エンタルピーの生産井でCIガスを含む過熱蒸気井における露点腐食に係る腐食試験を実施。

### ■ 現地試験状況

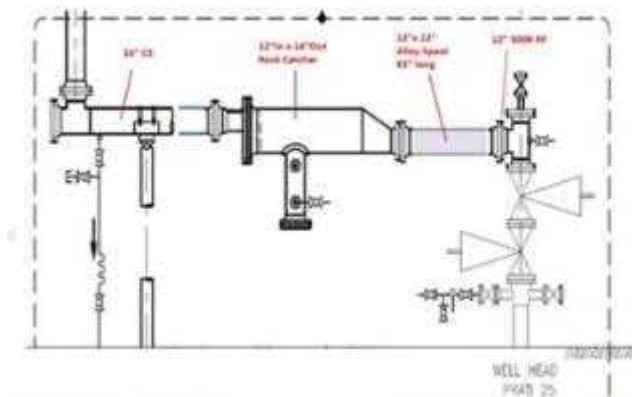
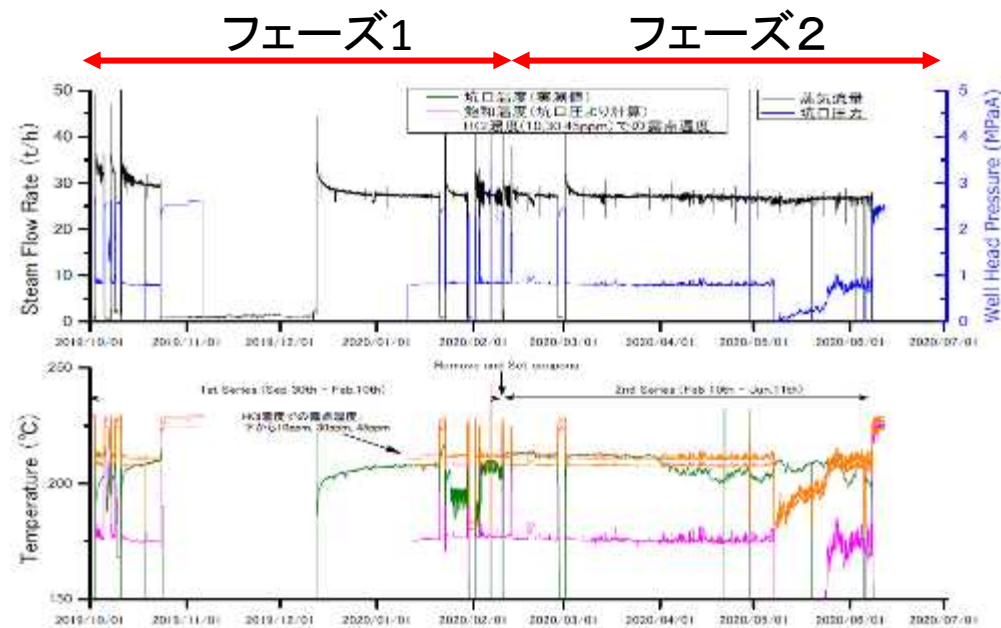
2019年9月30日～2020年6月11日にかけて実坑井試験を実施。

途中、2月10日に半分のクーポンを回収後、同数の新規クーポンを設置。

フェーズ1(前半)は森林火災、坑井トラブルにより生産停止が頻繁に発生し、安定しない期間が多く発生した。フェーズ2(後半)はほぼ安定した生産が実施された。

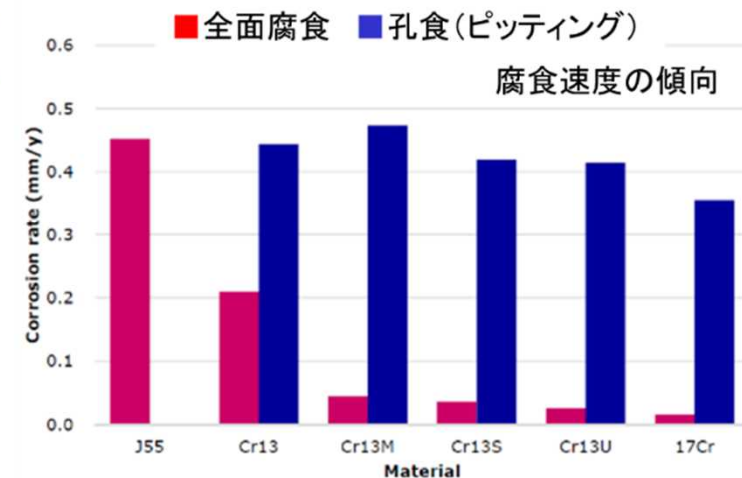
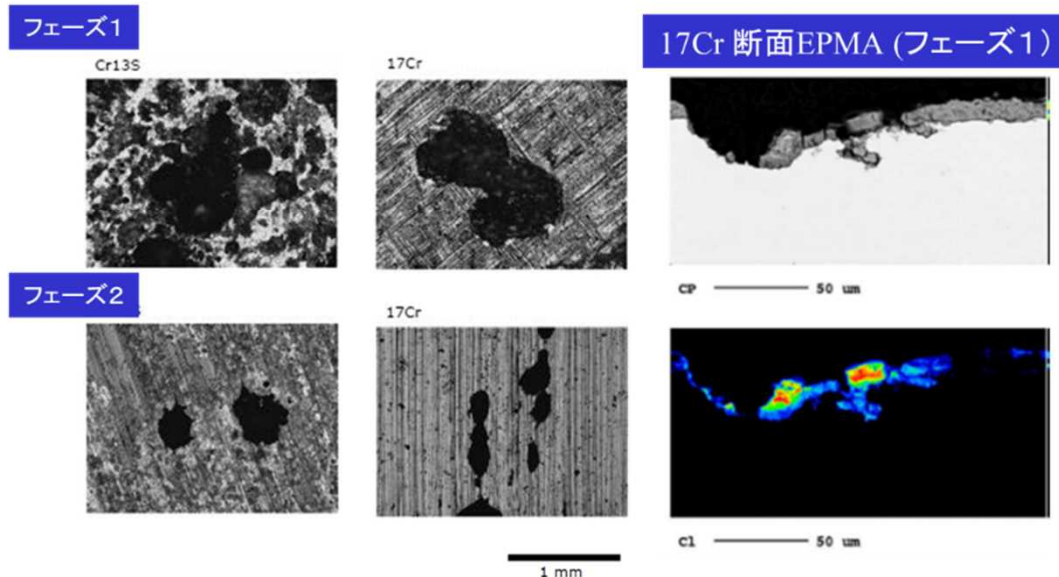
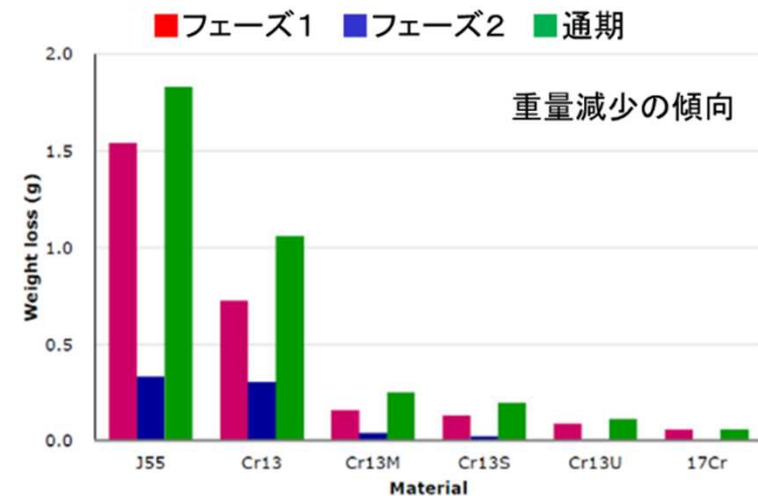
### ■ 試験材料

J55, TN 80Cr13, TN 95Cr13M, TN 95Cr13S,  
TN 125Cr13U(3Mo), 17Cr



## Ⅱ．最適材料選定に係る技術開発(開発項目③)

1. フェーズ1と比較し、フェーズ2の重量減少は明らかに小さく、ピittingも軽度である。これは、生産履歴(露点に対する坑口温度, およびシャットイン実施有無)の差異に起因すると見られ, 露点腐食の観点からフェーズ1の腐食速度を考慮すべきと考える。
2. Cr13Sや17Crでもピitting腐食が生じる。Cr13Sのピitting腐食速度はJ55の全面腐食速度と同程度である。
3. ガイザーズでの腐食試験の結果、過熱蒸気井では井戸のオペレーションによる影響が顕著であり、坑口・配管温度をCIガスを含む蒸気の露点より高くするオペレーションが重要であった。

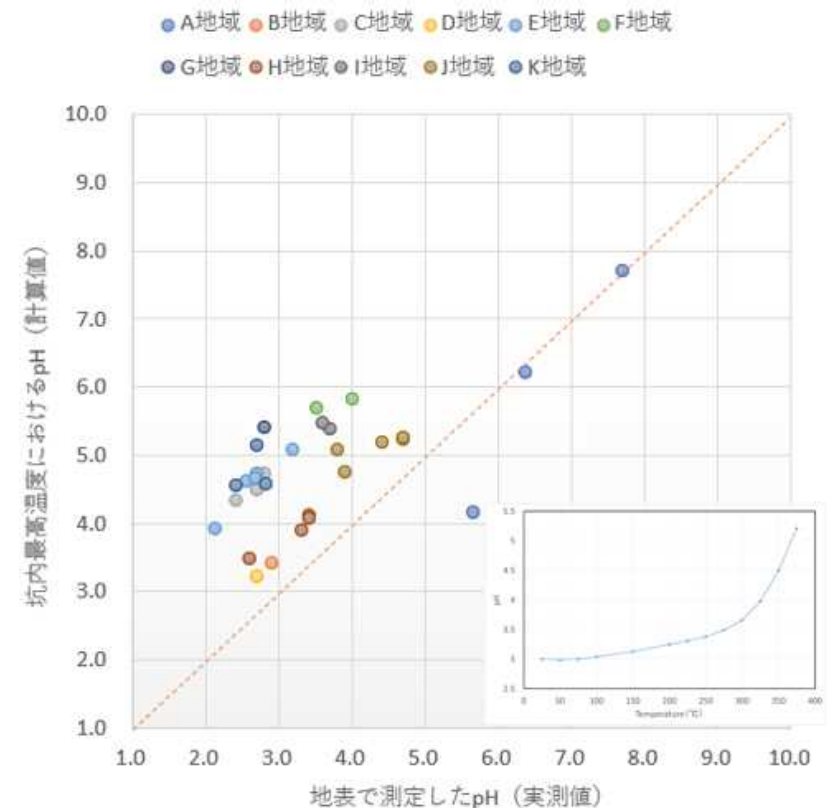
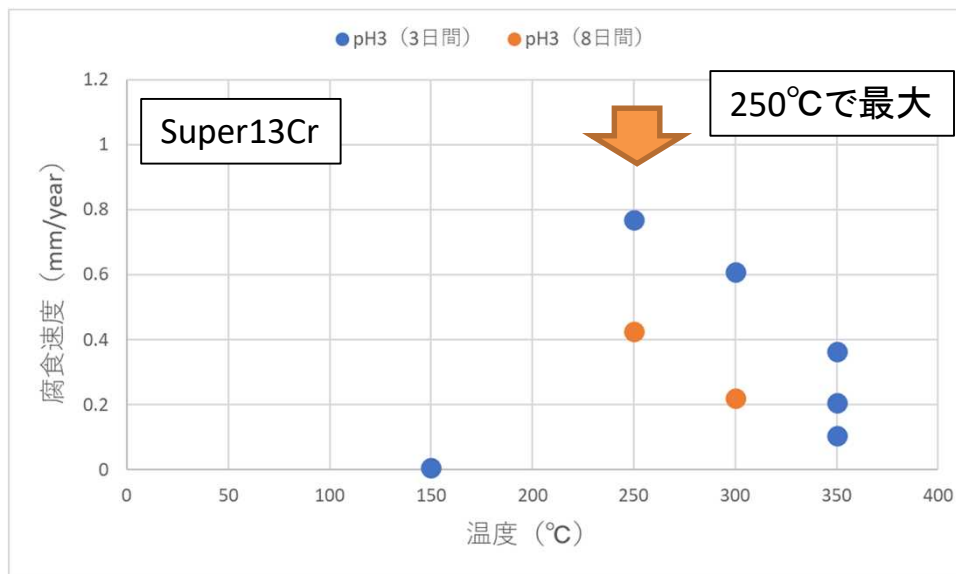


## Ⅱ．最適材料選定に係る技術開発(開発項目③)

温度に対する腐食速度を測定した結果，温度上昇に伴い腐食速度が大きくなるという当初の予想と異なり，250℃にピークを持つ傾向を示した。

- 既存の腐食速度予測式・材料選定チャートは，坑内のpH値は地表で測定したpHと大きく変わらないことを前提として作られている。

そこで，本技術開発では300℃以上でのpHシフトの影響を組み込んだ改良を行い，地表のpHデータから検討可能な式として開発を実施。



流体地化学データより地化学シミュレーションにて坑内最高温度でのpHを求めた値のプロット

## Ⅱ．最適材料選定に係る技術開発(開発項目②)

### ■ 目的

実験室・実坑井試験での腐食データを用い、材料腐食速度予測式の最適化を実施。

### ■ Cr当量による腐食速度予測式

#### ➤ HCl酸性での腐食速度予測式

$$\log(C.R) = 6.696 - 1930(1/T) - 0.622(\text{pH}) - 0.085(\text{Creq})$$

$$\text{Creq} = \text{Cr} - 13.73 \text{ C} + 1.598 \text{ Si} - 0.433 \text{ Mn} + 27.28 \text{ P} - 51.12 \text{ S} + 0.237 \text{ Ni} + 0.712 \text{ Mo} - 1.060 \text{ Cu}$$

#### ➤ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>酸性での腐食速度予測式

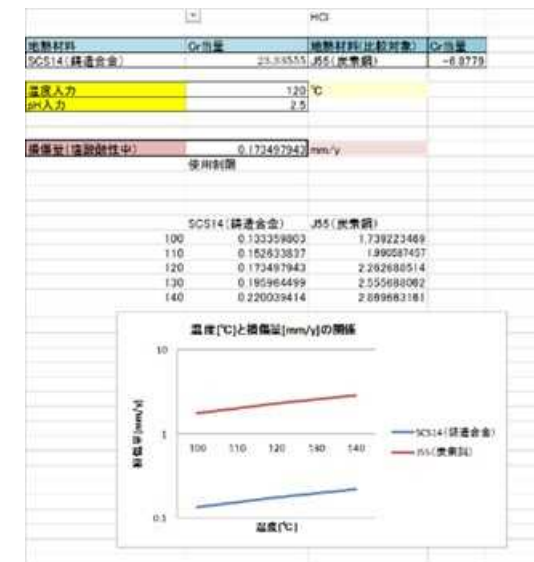
$$\log(C.R) = 6.467 - 1633(1/T) - 0.690(\text{pH}) - 0.093(\text{Creq})$$

$$\text{Creq} = \text{Cr} - 16.76 \text{ C} + 0.630 \text{ Si} - 0.193 \text{ Mn} + 10.2 \text{ P} - 35.11 \text{ S} + 0.187 \text{ Ni} + 0.020 \text{ Mo} - 0.725 \text{ Cu}$$

以上より、温度、pHおよび材料依存の係数で腐食速度が計算される。

### ■ 開発成果

- 既存の材料腐食予測式に関して、GNSの高温試験では、温度上昇に伴うpH変化を補正することで、温度変化による腐食速度の変化を説明することが可能となり、250～300℃付近で最大値を示した。
- 本予測式は、従来の予測式をベースにした概査版で、Cr当量から見た腐食速度の相対比は、おおまかに反映されている。本予測式を「地熱発電プラントリスク評価システム」に実装し、候補材料ピックアップの第1段階として利用できるようにした。





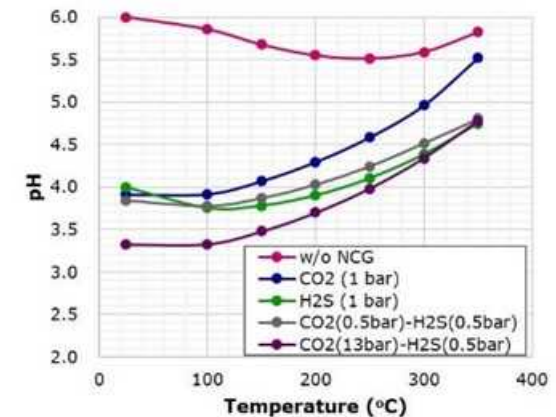
## Ⅱ．最適材料選定に係る技術開発(開発項目④)

### ■ 目的

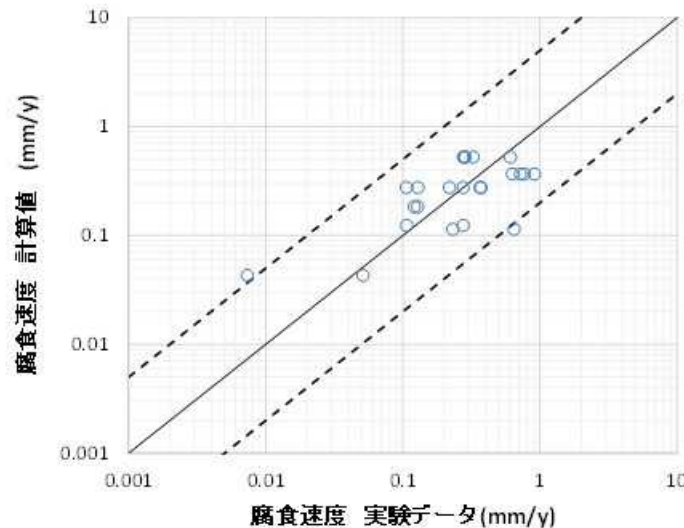
腐食試験結果を基にした高温低pH環境における腐食速度予測式および材料選定チャートの改良

### ■ 開発成果

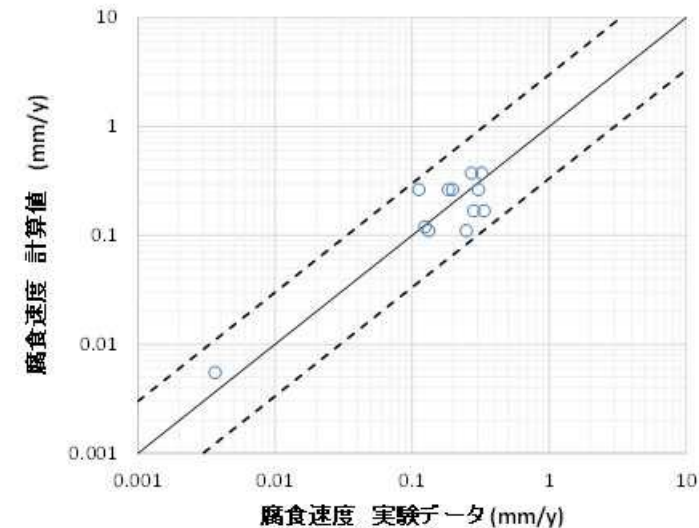
- 高温での予測pH(地化学シミュレーション)を基に、pH補正近似式を開発。CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S混合ガスの場合は低温側でCO<sub>2</sub>、高温側でH<sub>2</sub>Sの影響が大きくなるように重み付けを実施することで対応可能であることを確認した。
- 腐食速度の実験データと腐食速度予測式の計算結果の比較を下図に示す。全てのデータプロットがSuper 13Cr鋼の場合はFactor of 5のバンド内に入り、17Cr鋼の場合はFactor of 3の近似値が得た。
- 本予測式を「地熱発電プラントリスク評価システム」に実装し、K55, CrMo, 13Cr, Super13Cr, 17Crに対して、材料選定に係る詳細検討に利用できるようにした。



25°CでH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>によりpH6に調整した溶液とNCG雰囲気にした溶液の高温pH変化



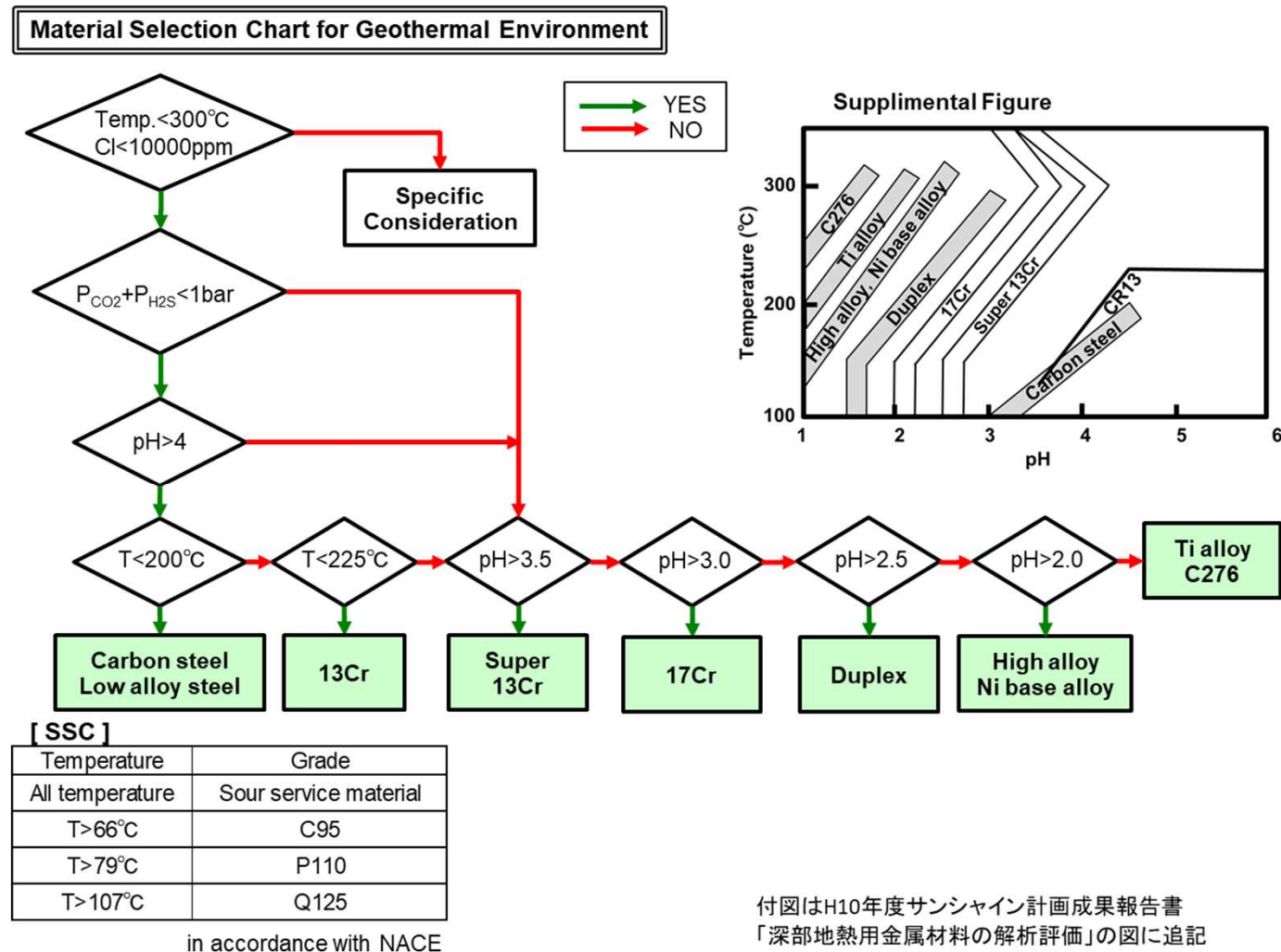
Super 13Cr腐食速度試験値と回帰式計算結果の比較



17Cr腐食速度試験値と回帰式計算結果の比較

## Ⅱ．最適材料選定に係る技術開発（開発項目④）

既存の材料選定チャートに対して、13Cr鋼と二相ステンレス鋼の間を埋める鋼としてSuper 13Cr鋼や17Cr鋼を含めたチャートを開発した。本チャートは非常に単純なものではあるが、材料選定の第一段階として有用である。本チャートは「地熱発電プラントリスク評価システム」に実装した。

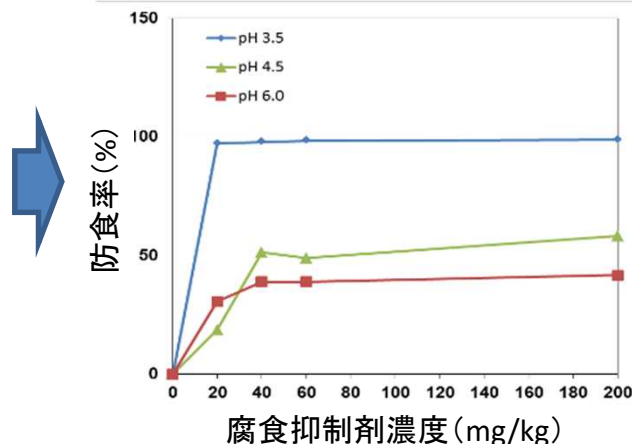


## Ⅱ．腐食抑制剤(インヒビター)試験(開発項目⑤, ⑥)

■ 国内外の腐食抑制剤(6種類)について、80℃の模擬酸性熱水による室内試験によるスクリーニングを実施した結果、pH3.5で高い防食効果のある腐食抑制剤を抽出した。

### 【試験条件】

- ・試験温度：80℃
- ・pH条件：3.5, 4.5, 6.0 /  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- ・溶液成分： $\text{Cl}^- = 9,500\text{mg/L}$ ,  $\text{H}_2\text{S} = 5 \times 10^{-5}\text{mol/L}$
- ・インヒビター濃度：0, 20, 40, 60, 200 mg/kg
- ・供試インヒビター：メーカー3社より、合計6種類内、1種類は石油・ガスで使用



6種類の内、最も効果の高かった腐食防止剤の濃度・pHに対する防食率試験結果

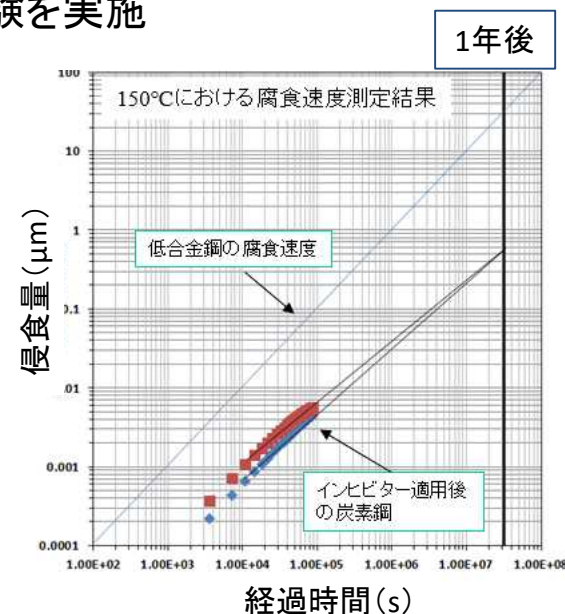
■ 有望な腐食防止剤(C-1)について150℃, pH3.5環境における腐食試験を実施

### 【試験条件】

- ・試験温度：150℃、24hr暴露
- ・pH状況：3.5 /  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- ・溶液成分： $\text{Cl}^- = 9,500\text{mg/L}$ ,  $\text{H}_2\text{S} = 5 \times 10^{-5}\text{mol/L}$
- ・インヒビター濃度：200mg/kg



- ⇒ 腐食防止剤適用後の腐食速度は低合金鋼の侵食度と遜色無し。(侵食速度: 0.001mm/年)
- ⇒ 孔食は少ないが、すきま腐食が認められた (0.24mm/年)。





## Ⅱ．腐食抑制剤 現地試験（開発項目⑤, ⑥）

選定した腐食抑制剤に対し、葛根田地熱発電所蒸気基地の還元熱水に対して適用し、腐食抑制剤の投入量と試験片の質量減量の関係について試験を実施した。

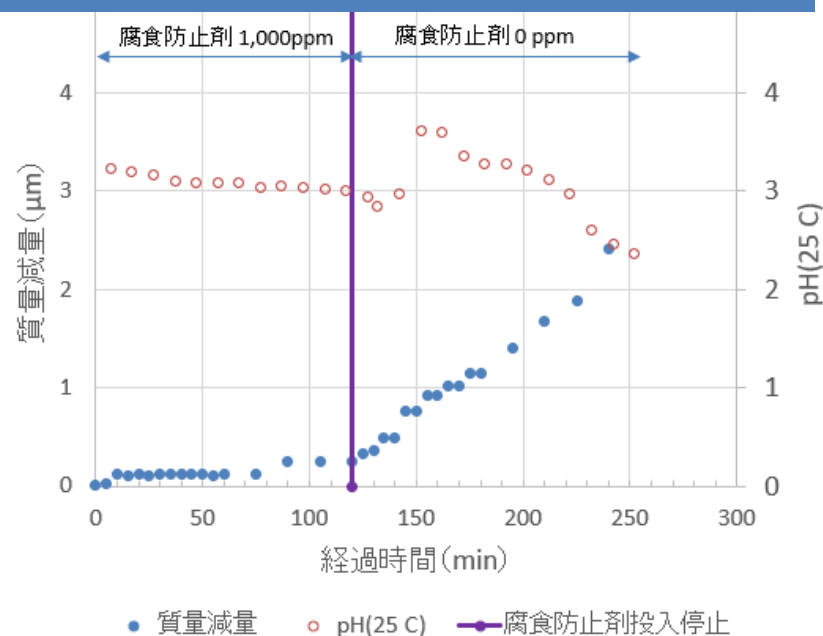
### ■ 試験条件

- 還元熱水の温度は160℃程度、硫酸にてpH3程度に調整。
- 試験はループ式腐食試験装置\*1を使用。試験片はK55（炭素鋼）を使用。

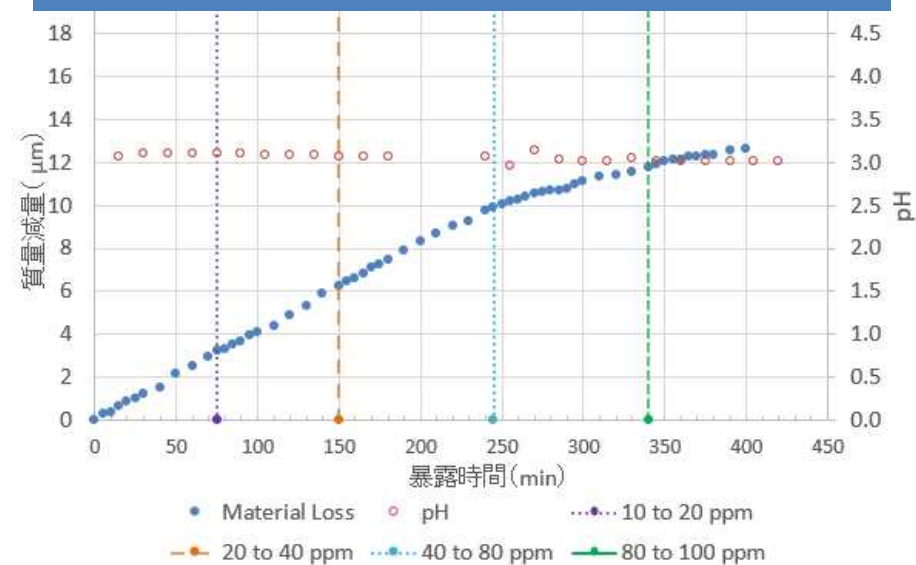
### ■ 試験結果

- 本腐食抑制剤の効果を発揮するためには、連続的な注入が必要であることが判明した。
- 腐食抑制に必要な濃度は100ppm以上であった。その際の腐食速度は0.3-0.6mm/y程度。
- 還元熱水など温度がそれほど高温でなく、低pHの環境において効果が期待される。

腐食防止剤1,000ppm⇒0ppm時の経時変化



腐食防止剤濃度変化時の質量減量経時変化



\*1:「地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発」の開発資産を移管し活用

# Ⅲ. 腐食シミュレーションによる予測技術の開発（開発項目⑦）

## ■ 予測技術開発の流れ

### 配管減肉速度予測式

支配的なパラメータを選定  
剪断応力と流れ加速型腐食 (FAC) 速度  
の関係を利用

### 仮説

流れ場の影響を固体の付着・剥離で  
表記  
⇒ 格子ボルツマン法により双方の問題  
の解析が可能

### 格子ボルツマン法による可視化

流体計算の安定性の向上・壁面近傍  
の流速ベクトルの補正

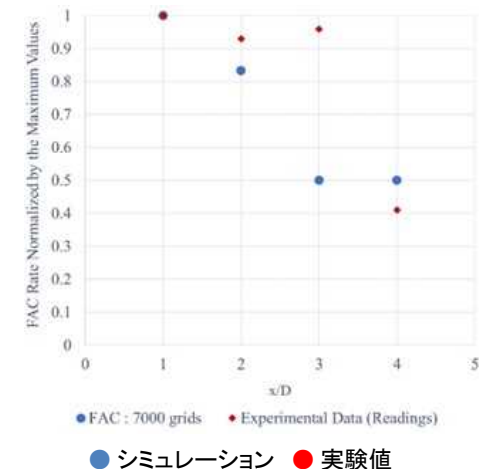
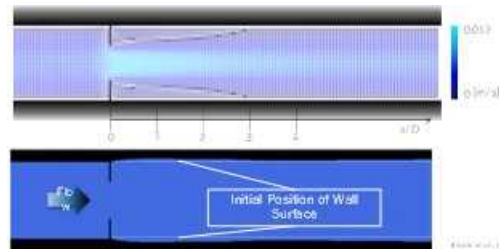
### 検証

1. 文献データとの比較
2. 腐食部分でのスケール成長モデル化
3. 腐食実験データの腐食シミュレーションへの取り込み, 腐食の時間変化予測

流体力学的要因を考慮した局所的な減肉現象予測に成功した。

## ■ オリフィス部の局所的減肉の再現

- オリフィス通過後の4地点で配管腐食量を計測。
- 流れ場の影響を考慮したシミュレーションの妥当性を示す結果
- 地点3はキャビテーションによる機械的壊食の可能性

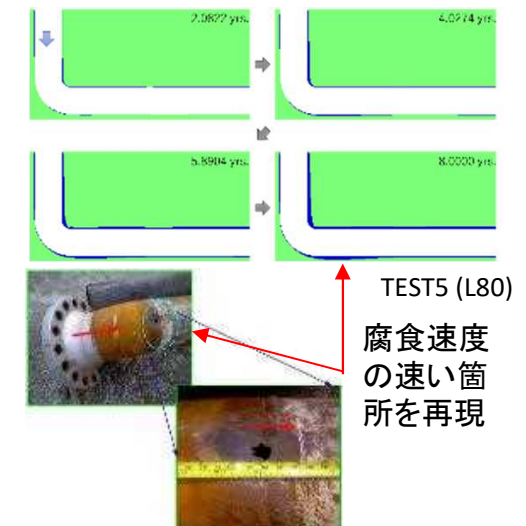


## ■ 腐食実験データのシミュレーションへの取り込み

- 絶対時間をシミュレーションに組み込むよう, 腐食・スケール付着双方の実験データ取り込みの技術を確立。
- 実験結果を用いた, 他の材質のパイプの腐食可視化。
- スケールの生成条件の検証を実施し, 腐食リスクを低減する条件の検討。

Material	TEST	inhibitor	試験時間 (hour)	断面平均流速 (m/s)	腐食速度 (mm/year)
L80	TEST3	有	25	0.1849	1.5225027
	TEST4	無	4	0.1705	7.8975977
	TEST5	無	16	0.1667	2.9664148

これらの条件を基に, 管壁におけるせん断応力と腐食速度の関係式を決定した。



(Fadli et al., 2015)

# I. 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムの開発) 開発項目①(要素技術②～④の成果を統合)

- 地熱発電プラントリスク評価システムの開発(開発項目②～⑤の要素技術を反映)
- ソフトウェア化によるデータベースの検索速度の向上, 腐食速度予測式等のノウハウ 漏洩リスクの低減, ユーザビリティの向上
- 操作マニュアル・配布用パンフレットの整備

## システムの概要

### ■ 概要

本成果は、産業技術総合研究所 旧東北工業技術試験所で実施されたサンシャイン計画研究にける膨大な地熱に係る腐食データをベースに、新たに実施した新規材料（地熱での利用実績の少ない材料）の腐食試験データを加え、酸性熱水資源を活用する上で必要となる情報をリスク評価システムとして統合化したソフトウェアです。酸性熱水の利用を検討される地熱開発事業者の方々が、腐食に係る基本的な情報に簡単にアクセスできることを目的に開発されています。

リスク評価システムに含まれる機能は以下の通りです。

### ■ 機能

- 機能1：金属材料腐食速度試算
- 機能2：金属材料選定チャート
- 機能3：金属材料による経済性評価
- 機能4：材料腐食速度データベース
- 機能5：腐食に係る文献データベース



## 地熱発電プラントリスク評価システム

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

地熱発電技術研究開発／地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発／未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発（在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発）」成果

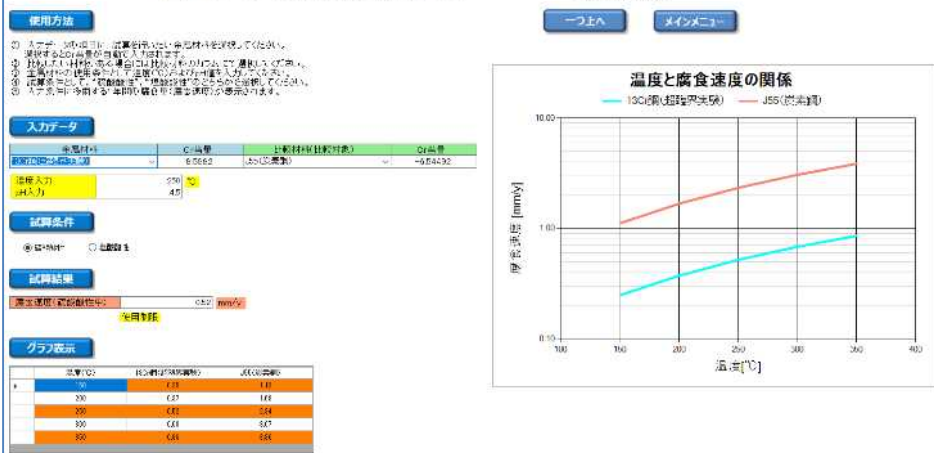
- 事業年度：2018～2020年度
- 委託先：地熱技術開発株式会社
- ：国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ：エヌケーケーシームレス鋼管株式会社
- ：国立大学法人京都大学



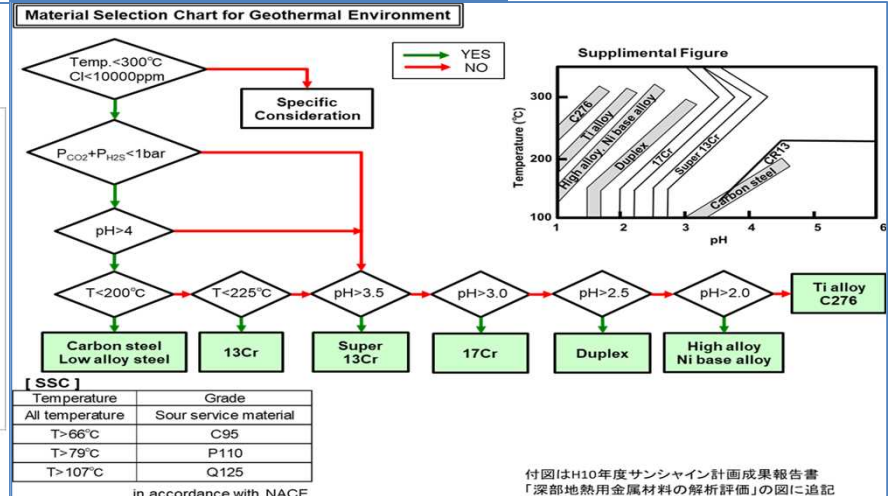
# I. 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムの機能) 開発項目①(要素技術②～④の成果を統合)

## ■ 腐食速度試算機能

### Cr当量による腐食速度試算



## ■ 金属材料選定チャート



## ■ 経済性評価機能

### 各鋼種の腐食試験データに基づく経済性評価



## ■ 腐食関係論文データベース機能

条件入力画面

※ 選択による検索

データ選択

検索条件

検索結果

検索設定

検索

# 成果の実用化・事業化の見通し

開発成果である「地熱発電プラントリスク評価システム」の配布を通じて、事業者において酸性熱水活用の検討が以前より増えることで、その後のコンサルタント調査、ならびに耐腐食性材料を使用したケーシング・配管材料の売上増を目指すとともに、地熱発電所の利用率向上、設備容量の増加を目指す。

