



電中研における FACの予測技術の開発研究

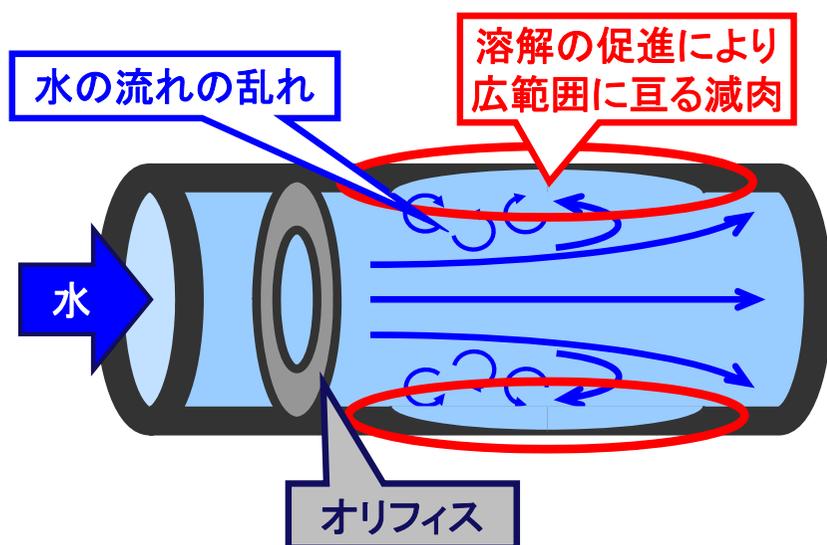
電力中央研究所
軽水炉保全研究特別チーム
機器・配管健全性ユニット
(原子力技術研究所／材料科学研究所)

 電力中央研究所

研究の背景(1) 配管減肉現象

流れ加速型腐食 (FAC)

- ◆ 配管の鉄分の溶解(腐食)が、水の流れにより促進される現象
- ◆ 主に復水系・給水系で発生
- ◆ 大規模破断に至る可能性あり

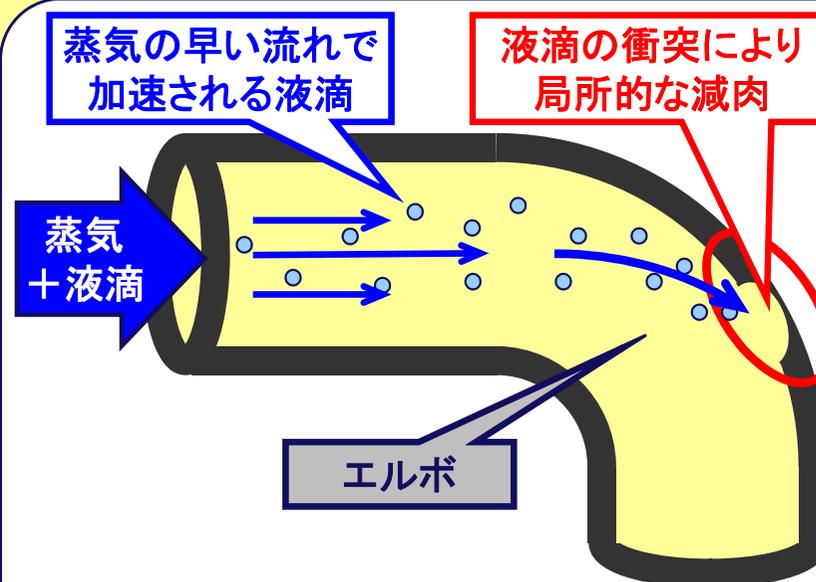


オリフィス下流でのFACの模式図

※FAC: Flow Accelerated Corrosion

液滴衝撃エロージョン (LDI)

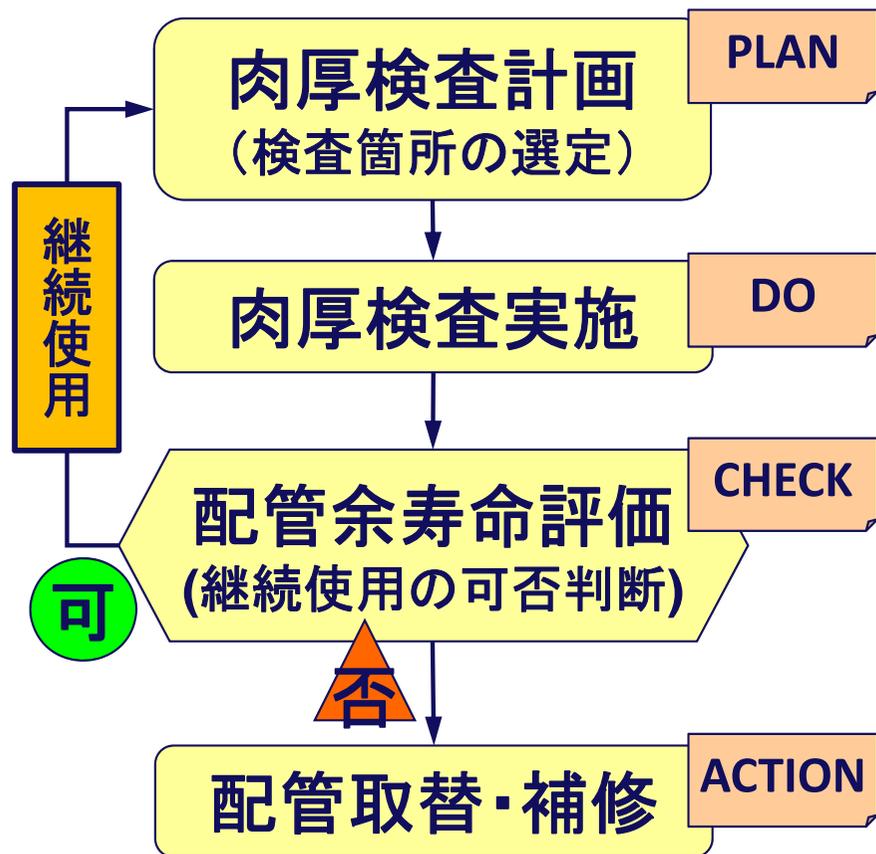
- 高速蒸気流中の液滴の衝突で、配管の壁が削られる現象
- 主にドレン系・ベント系で発生
- ピンホールからの小規模漏洩



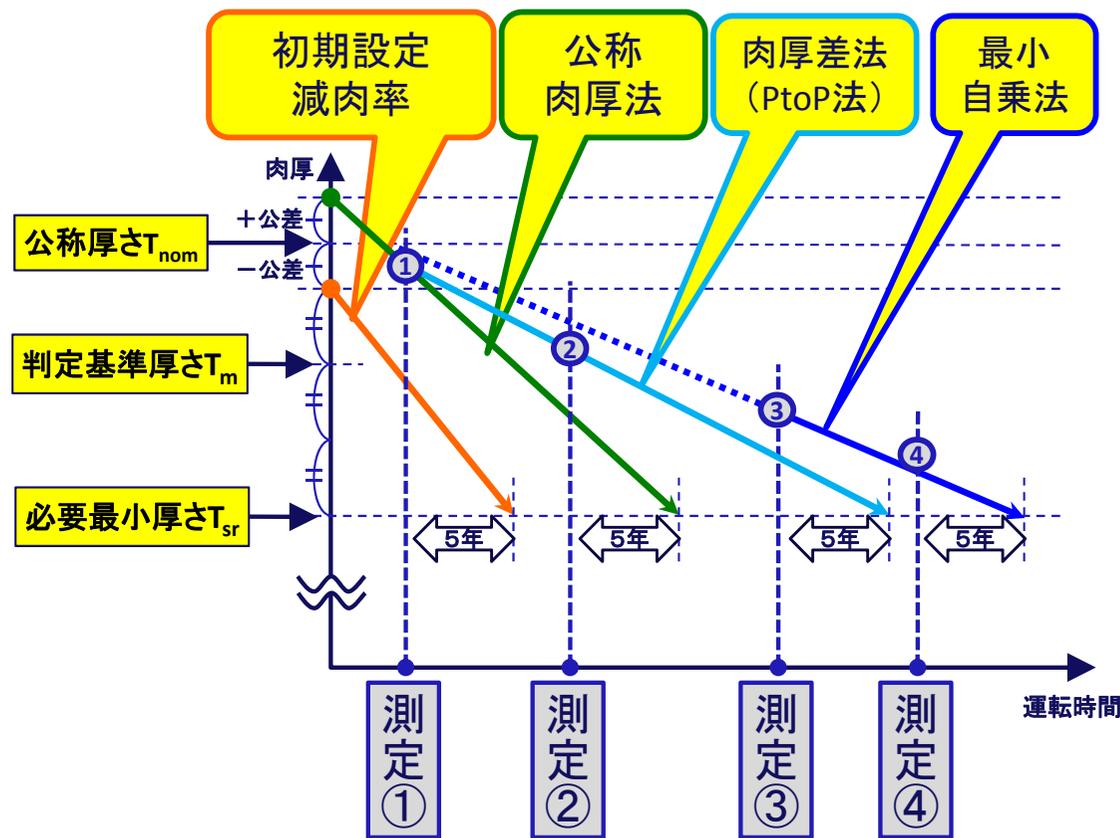
エルボでのLDIの模式図

※LDI: Liquid Droplet Impingement Erosion

研究の背景(2) 配管減肉管理



配管減肉管理の流れ



肉厚測定に基づく余寿命評価 (PWRの場合)

- ◆ 日本機械学会 (JSME)「配管減肉管理に関する規格」に基づく管理
 - 配管の肉厚測定により減肉の進展を把握し余寿命を評価
- ◆ 余寿命評価の精度向上には複数回の肉厚測定が必要

研究の目的・内容

- ◆ 配管に対する適切な管理(肉厚検査)によるトラブル防止
- ◆ 肉厚検査の対象範囲や実施時期の最適化



- ◆ 配管条件に基づく減肉現象の予測手法の開発
 - 現場管理に適用可能な予測ソフトウェアの開発



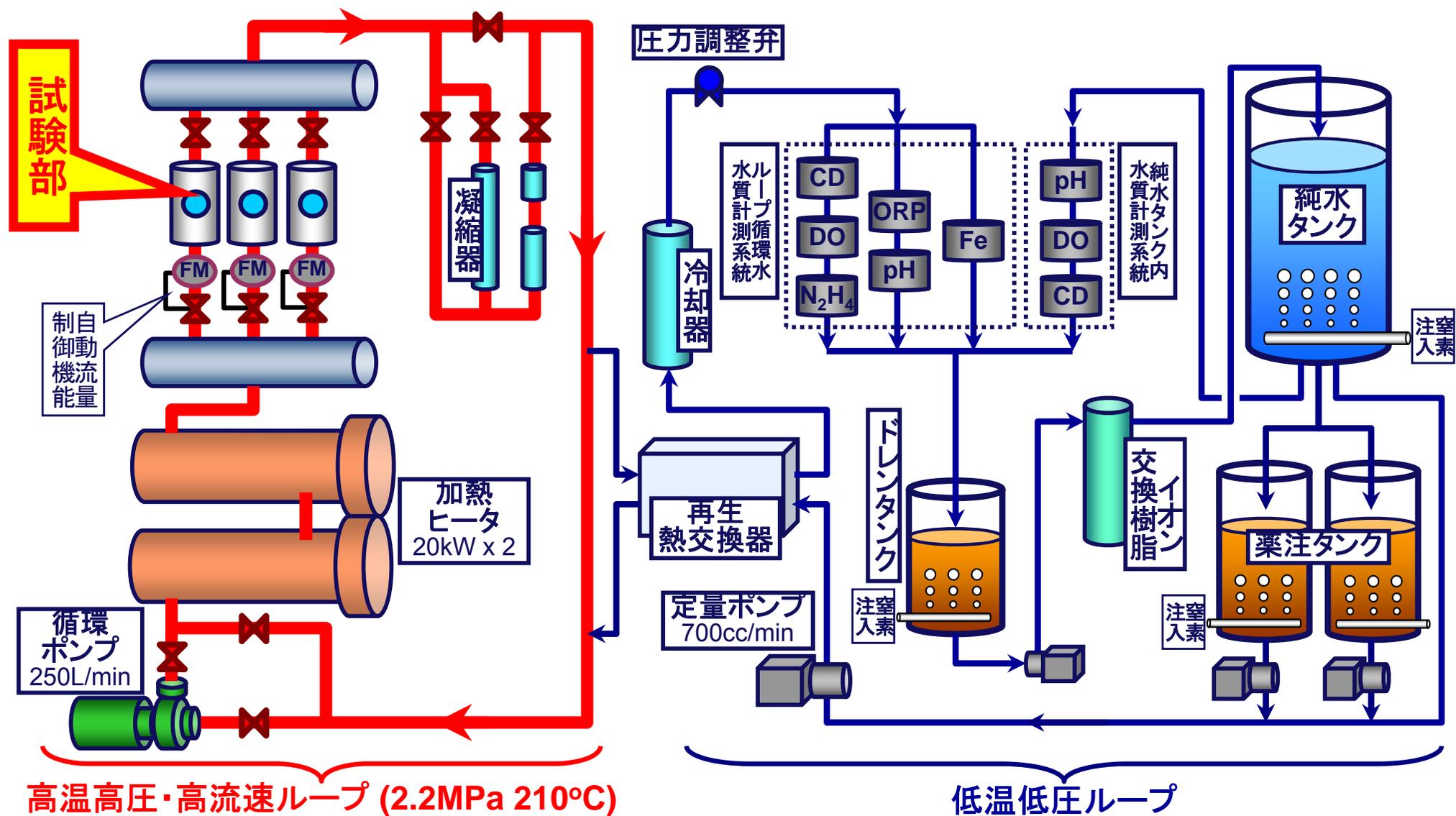
- ◆ 配管条件を模擬した環境下でFAC/LDIの実験データを取得
 - 実験データを用いて予測手法の妥当性を確認

電中研のFAC試験設備（单相，流動因子） 1/5

【設備①】
FAC実験設備（流動因子影響評価，水单相流）

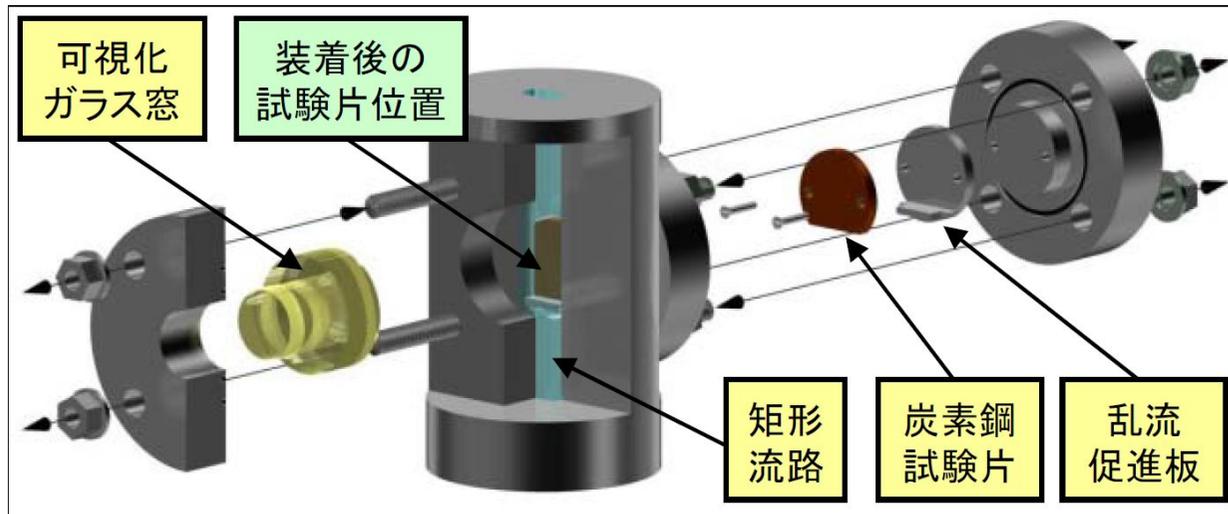


電中研のFAC試験設備（单相，流動因子） 2/5



水单相流FAC減肉実験設備概要

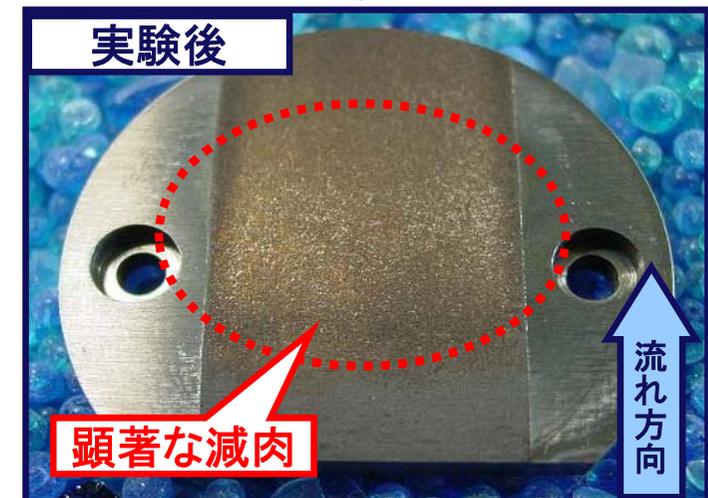
電中研のFAC試験設備（单相，流動因子） 3/5



減肉実験試験部の概略

◆ 実験パラメータ

- 温度、pH、流速、絞り比



実験前後の減肉試験片の例

電中研のFAC試験設備(单相, 流動因子) 4/5

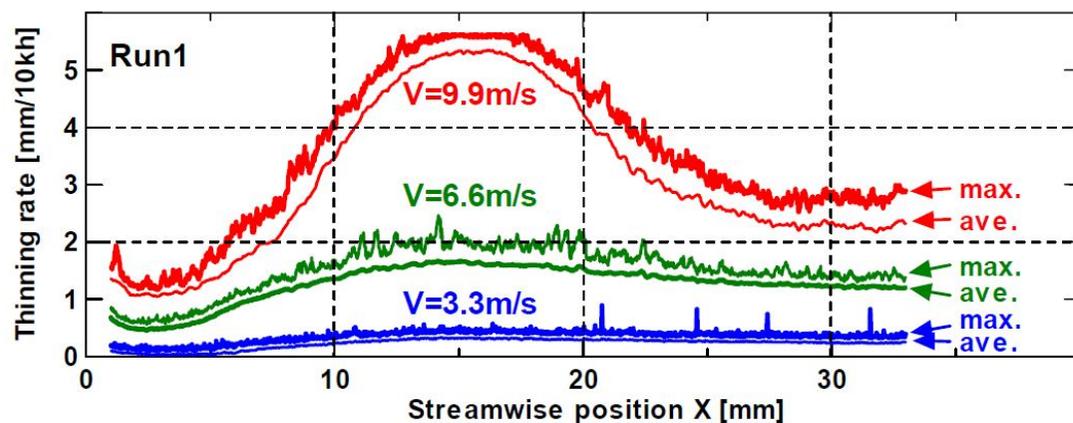
◆ FACの流動因子影響の評価試験設備

- 水質調整のための低温・低圧ループと, FACを生じさせる高温・高圧ループで構成
- 温度, pH, DOを水化学条件として任意に設定し, 流速や流れの乱れ強さをパラメータとしたFAC試験を実施可能
- 試験部は矩形流路として上流に乱流促進板を設置してFACを促進. ガラス部を通じてレーザ変位計を用いて減肉量(板厚変化)を計測

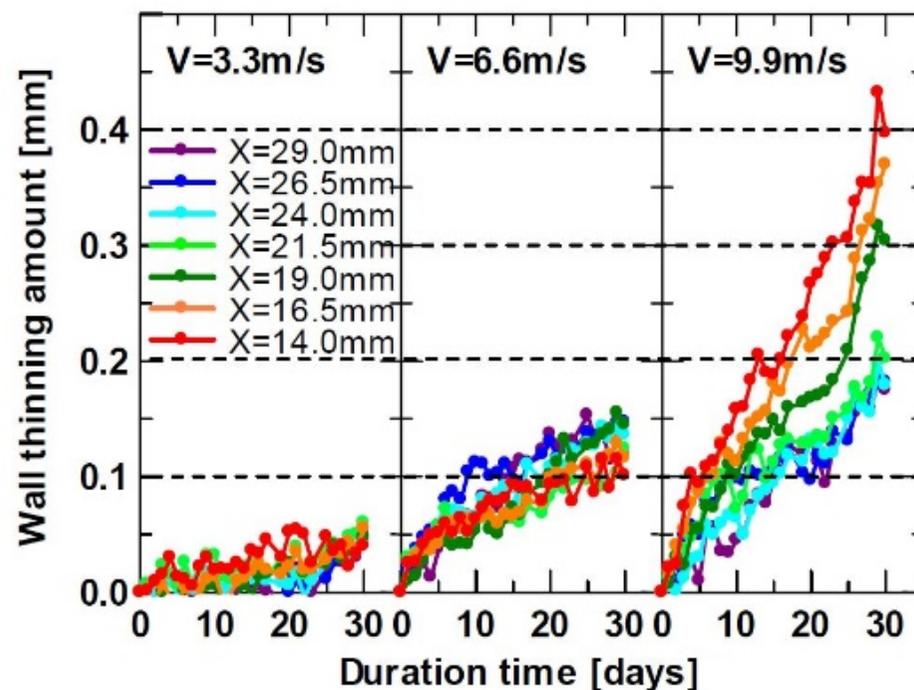
電中研のFAC試験設備(单相, 流動因子) 5/5

◆ FAC試験結果例

- FACによる減肉の時間変化: 概ね線形
- 流速の影響: 流速の増加と共に大きく変化



各流速条件における減肉速度分布

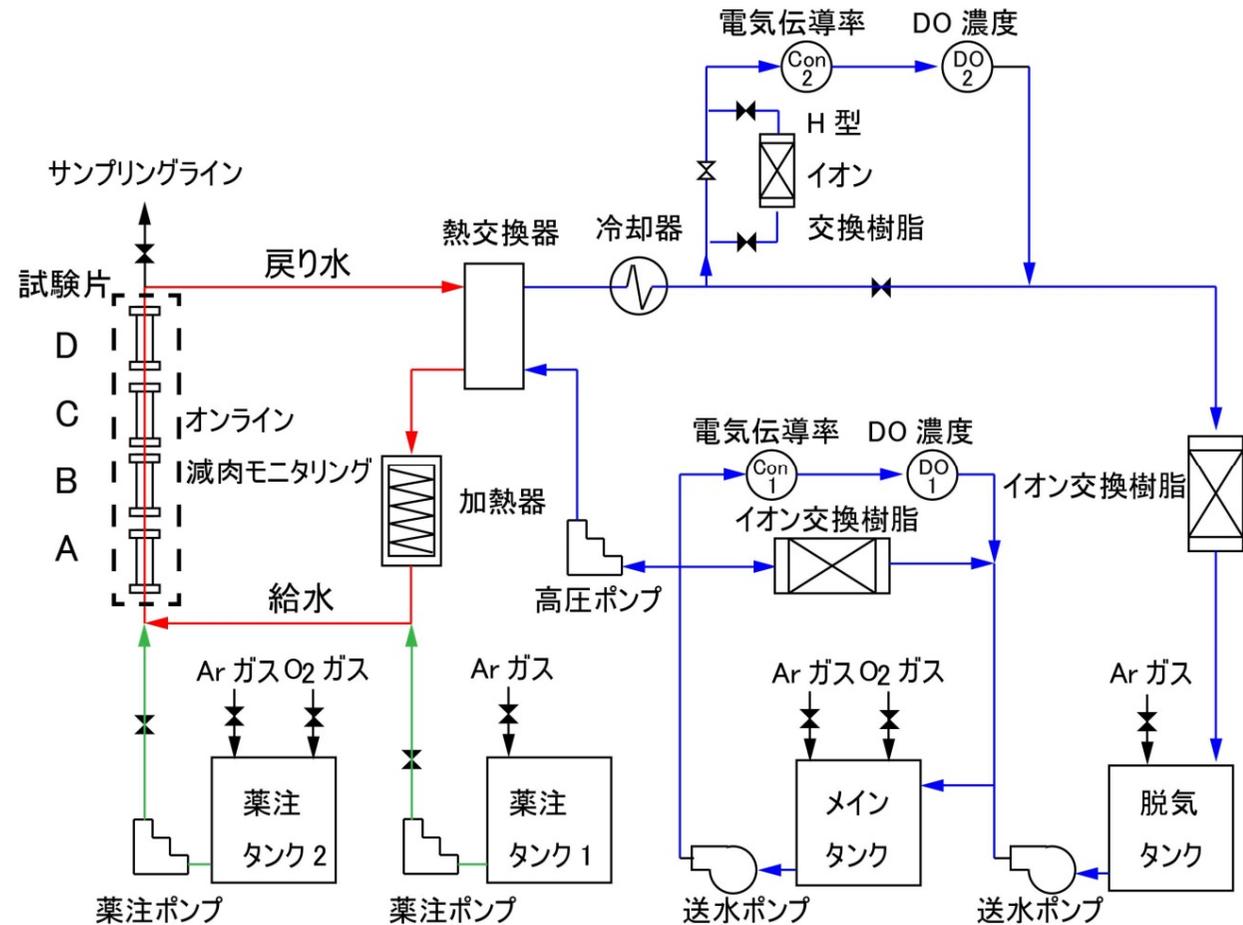


各流速条件における減肉速度の時間変化

電中研のFAC試験設備(单相, 材料・水化学因子) 1/4

◆ 主な使用

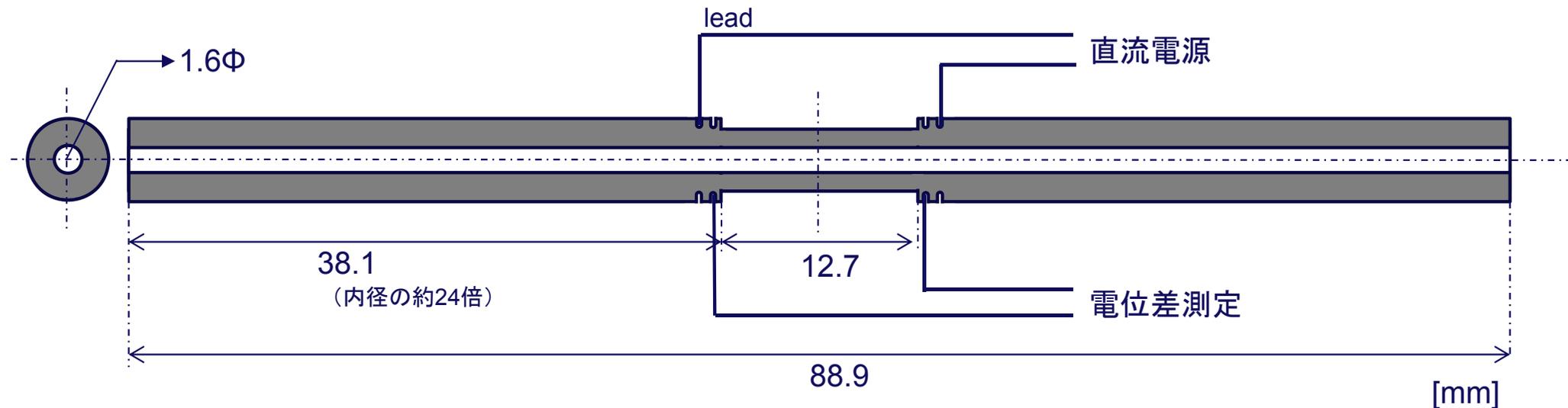
- 最高温度 : 200°C
- 最高圧力 : 10MPa
- 材質 : SUS316L
- 常用流量 : ~1.5L/min
- 試験片数 : 4本 (直列)



FAC抑制法評価試験装置

電中研のFAC試験設備（单相，材料・水化学因子） 2/4

オンライン減肉モニタリング



電位差法による肉厚測定方法

- ・2点間の電気抵抗の変化から平均肉厚(W)を定期的に測定。

$$W = (d_o - d_I) / 2$$

$$d_I = \sqrt{d_o^2 - 4\rho L / (R - \alpha)\pi}$$

R: 電気抵抗(Ω)

ρ : 比抵抗(Ω m)

L: 電極間距離(m)

d_o : 測定部の外径(m)

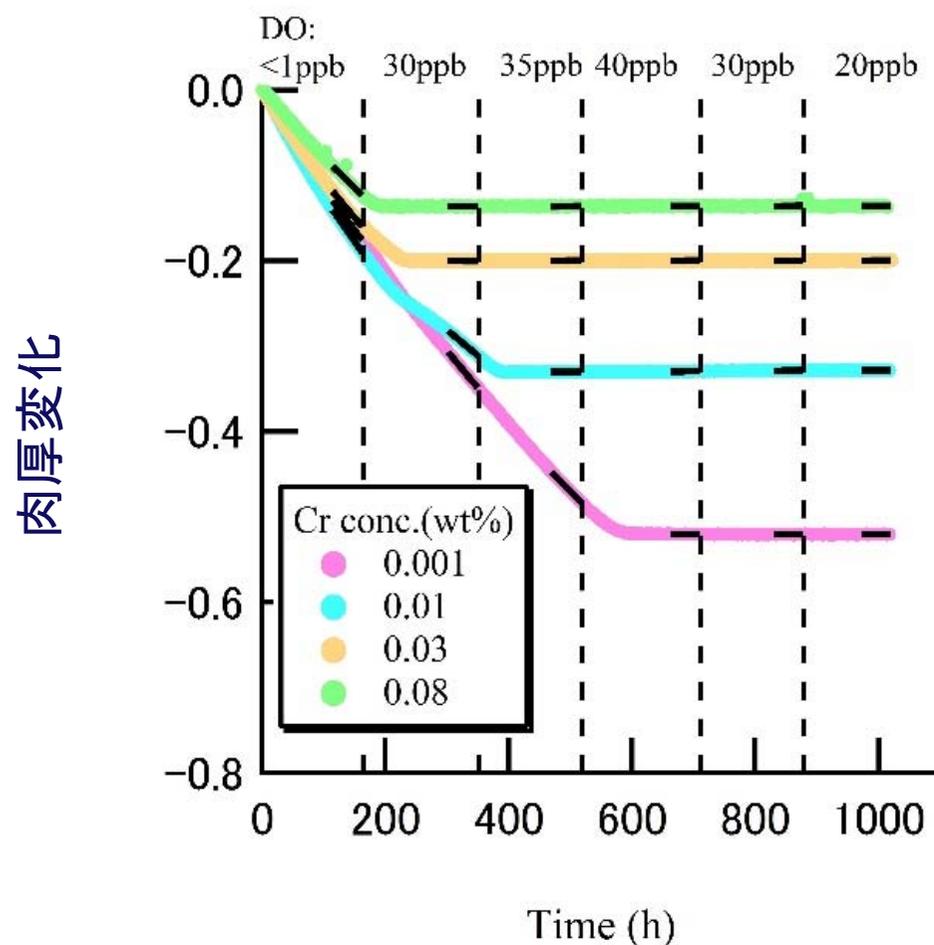
d_I : 測定部の内径(m)

W: 測定部の肉厚(m)

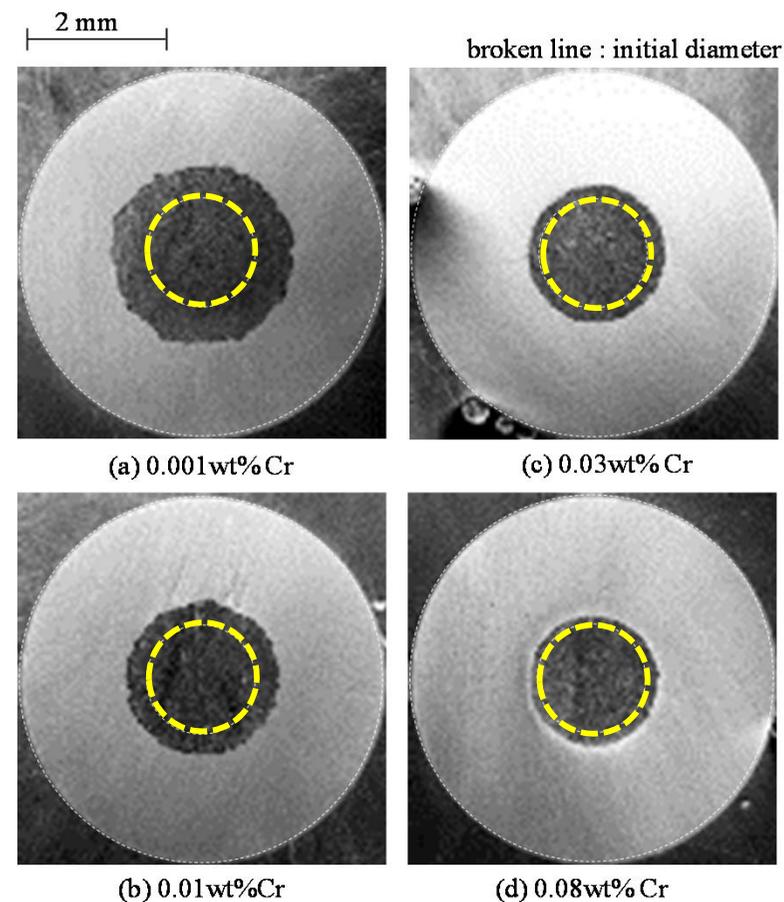
α : 補正係数

電中研のFAC試験設備(单相, 材料・水化学因子) 3/4

測定例: 145°C, pH_{25°C}7.0の脱塩水中で段階的にDO濃度を上昇



Cr濃度の異なる試験片の肉厚変化

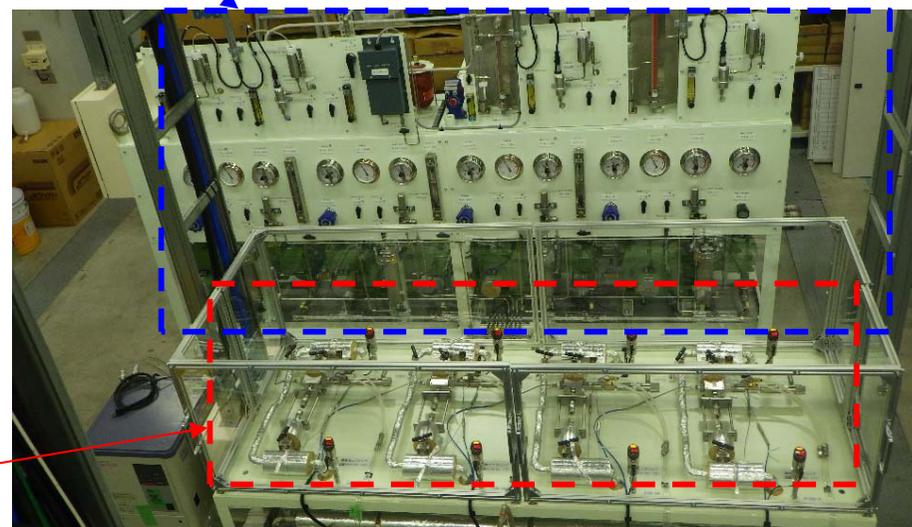
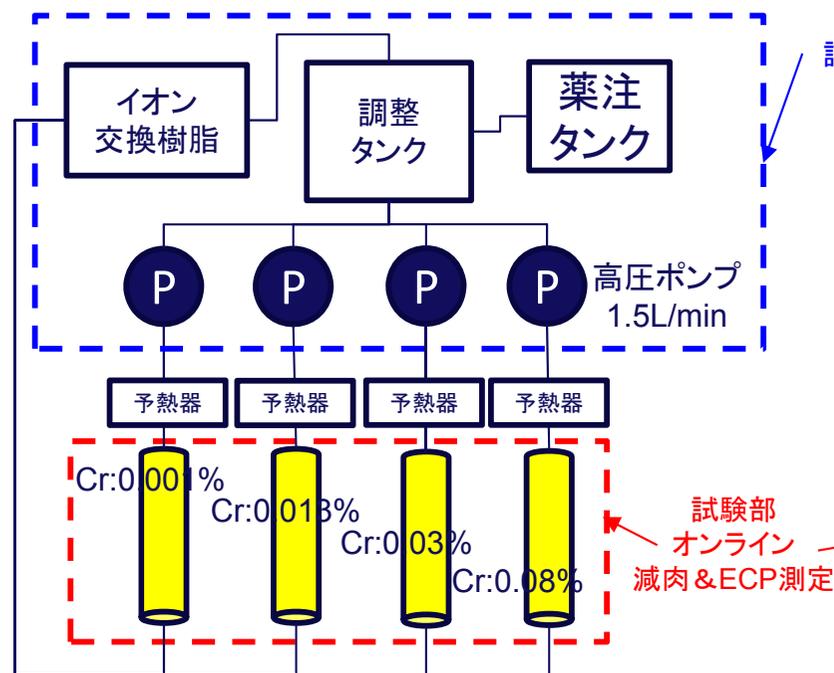


試験後の流路断面

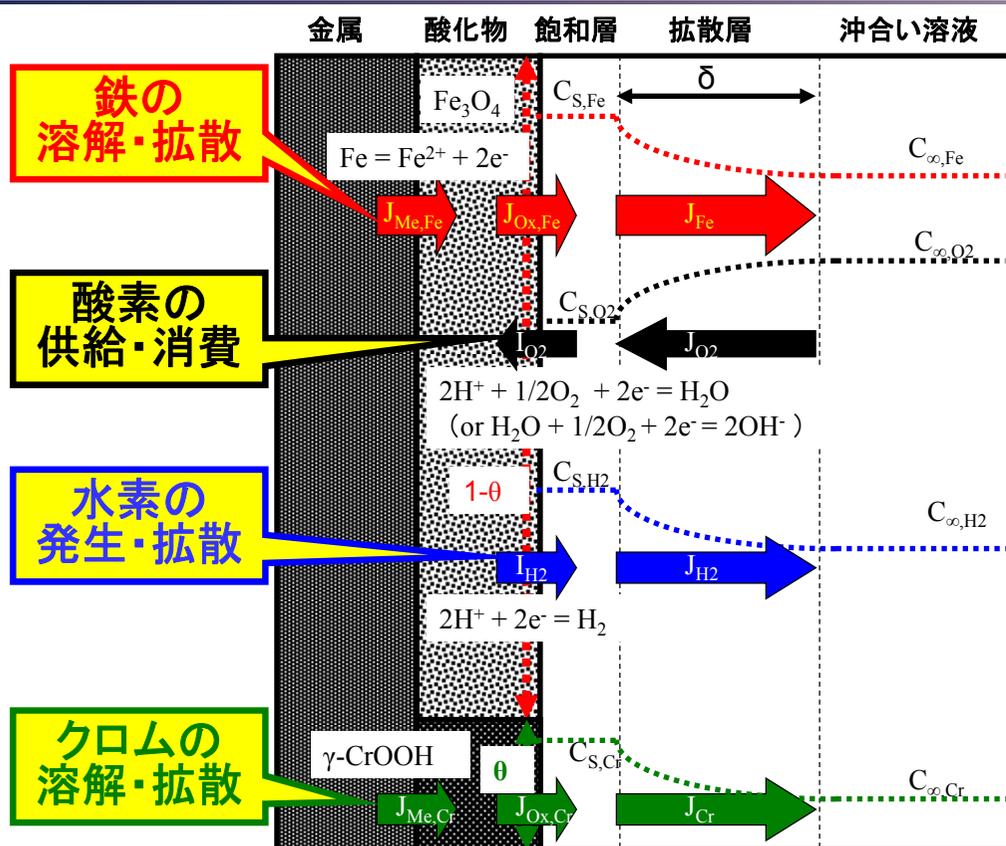
電中研のFAC試験設備（单相，材料・水化学因子） 4/4

◆ 基本条件

- 試験片材質/形状：炭素鋼（STPT480）※/管状
- 温度：最大180°C
- 流速：1.7L/min
- 特徴
 - 並列（4系統）に配列した試験片に同一条件の試験水を供給
 - 試験片にはこれまでと同等の腐食モニタリングシステムを配置



電中研のFAC予測モデルの開発 1/3



【予測手法の仮定】

- FACによる減肉は定常状態
- マグネタイトを主成分とした酸化皮膜
- 酸化皮膜表面の飽和溶解層の存在
- 拡散層における拡散が律速過程

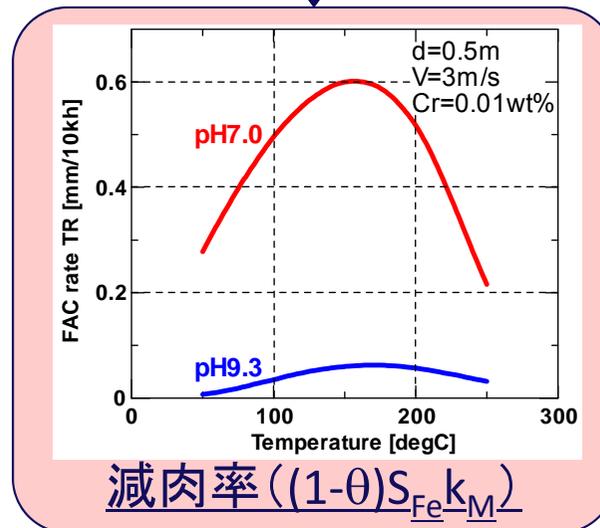
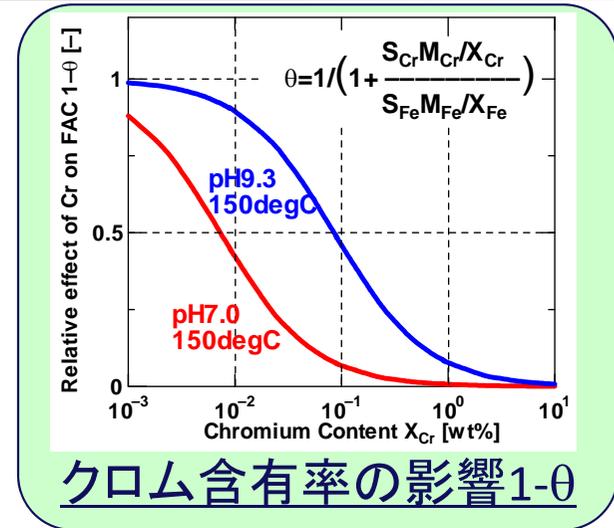
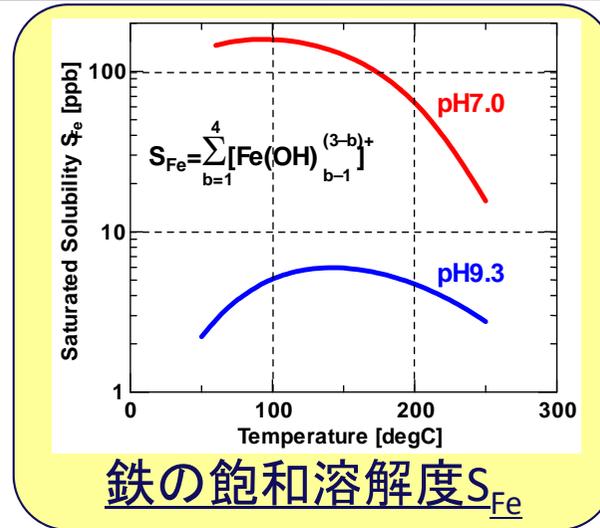
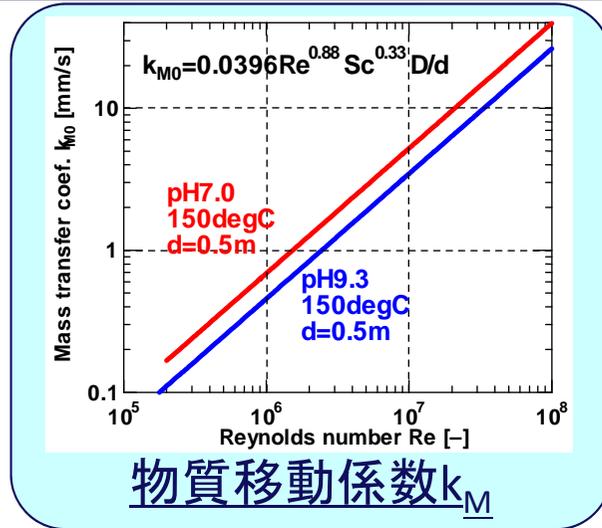
FACの現象モデルの概念図

◆ FAC減肉率 (TR) の予測式は主要な影響パラメータの積で構成

- 流体力学因子: 物質移動係数 k_M
- 水化学因子: 鉄の飽和溶解度 S_{Fe}
- 材料因子: クロム酸化物の面積比 θ

$$TR = (1-\theta)S_{Fe}k_M$$

電中研のFAC予測モデルの開発 2/3

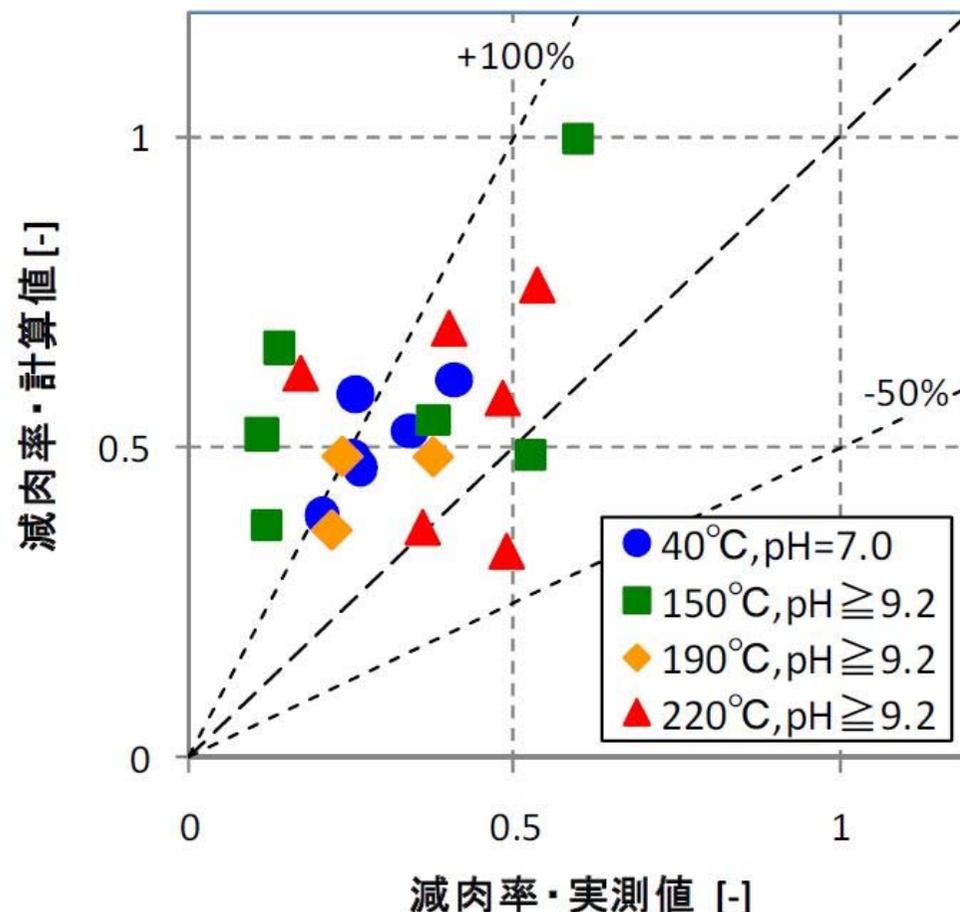


FAC予測モデルの主要な構成要素と減肉率の予測傾向

電中研のFAC予測モデルの開発 3/3

◆ 実機プラントのデータによるモデルの検証

- ▶ 実機BWRプラント/PWRプラントの減肉データによる予測モデルの性能評価を実施
- ▶ 概ね保守側の評価, 高減肉箇所についてはファクター2以内での評価



FAC予測モデルの予測値と実測値の比較

FAC予測ソフトウェアの開発 1/4

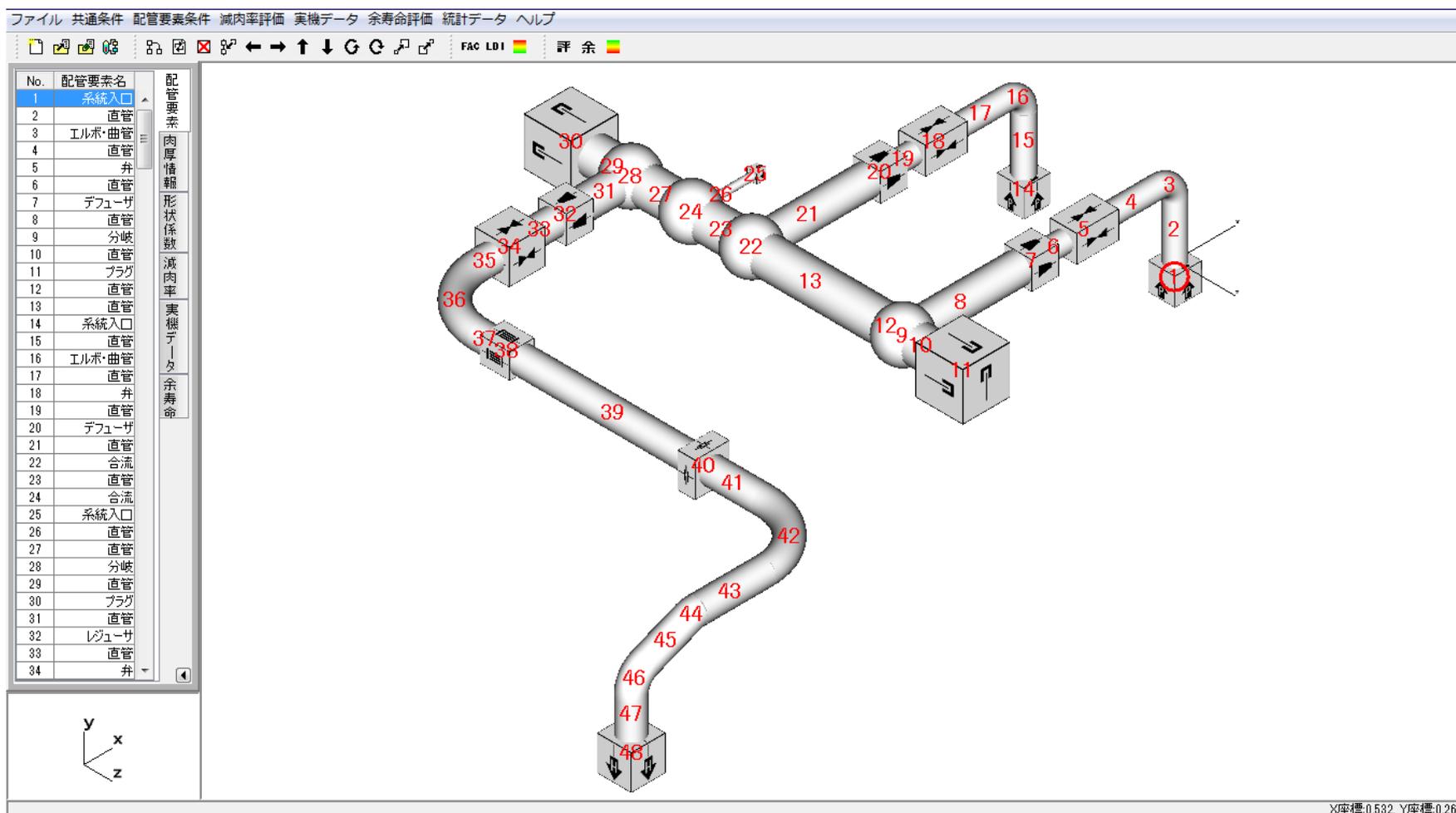
◆ 配管減肉予測ソフトウェアFALSETの開発

- **FALSET: FAC and LDI Prediction Software for Pipe Wall Thinning**
- 実機発電プラントの減肉管理における簡便な利用を想定した、当所独自開発の配管減肉予測ソフトウェア

◆ FALSETの基本的な設計理念

- **現場での実用性**
 - プラント現場のデータ・情報を基に減肉率・余寿命評価を短時間で評価
- **視覚的な理解性**
 - 系統配管の中で管理上の優先度が視覚的に理解しやすい表示
- **評価の説明性**
 - 公開情報を基にした減肉率・余寿命評価、技術的根拠の参照提示

FAC予測ソフトウェアの開発 2/4



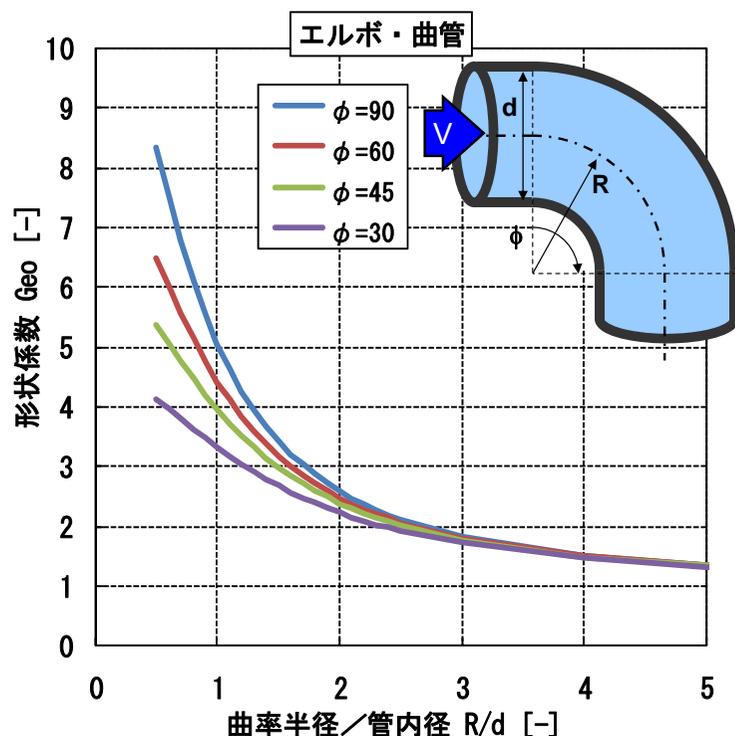
配管レイアウト入力例

◆ 配管レイアウトの入力

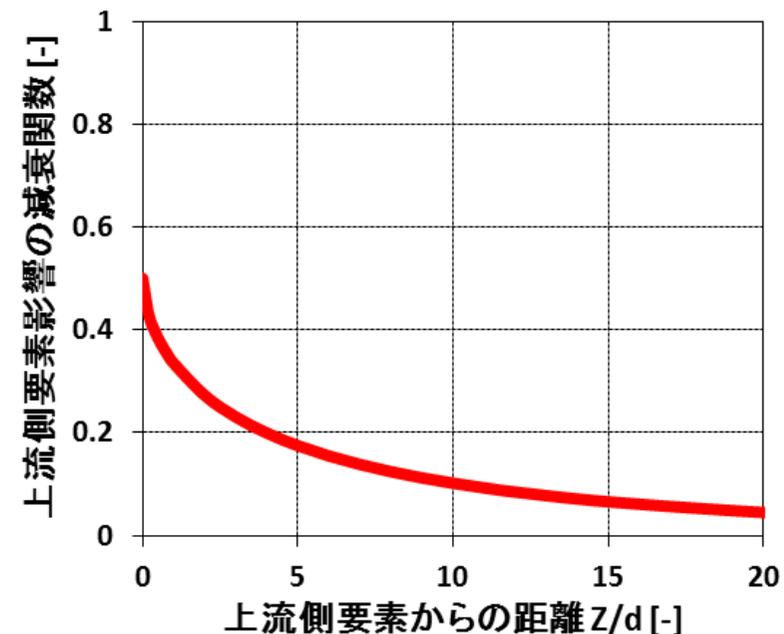
- 配管全体レイアウトがアイソメ図面に対応して三次元的に表示

FAC予測ソフトウェアの開発 3/4

配管要素の相対的な減肉傾向(形状係数Geo)
(エルボ・曲り管の例)



上流側要素の影響

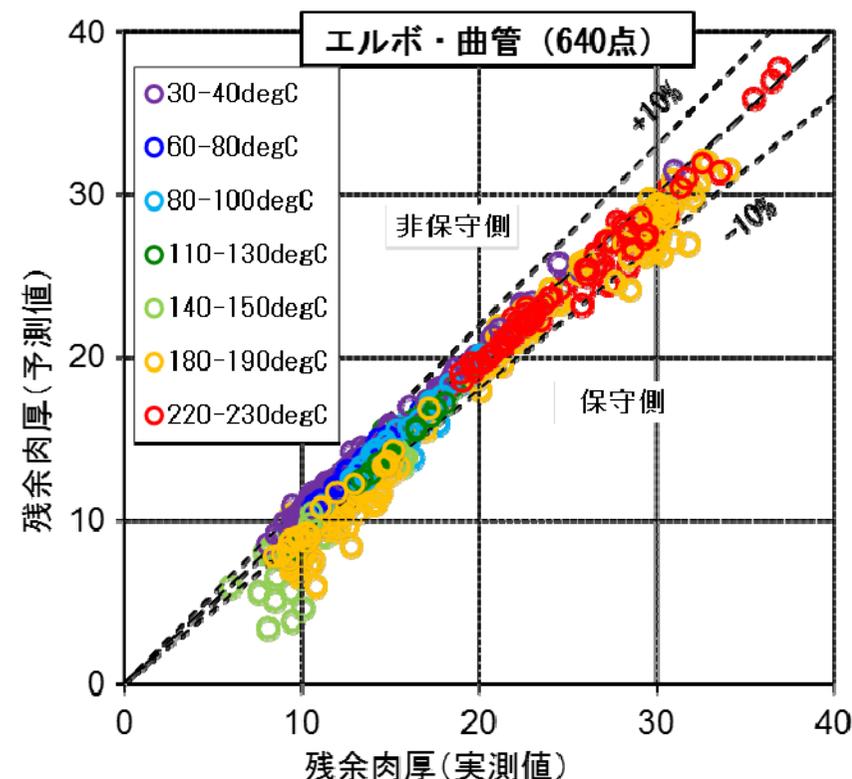
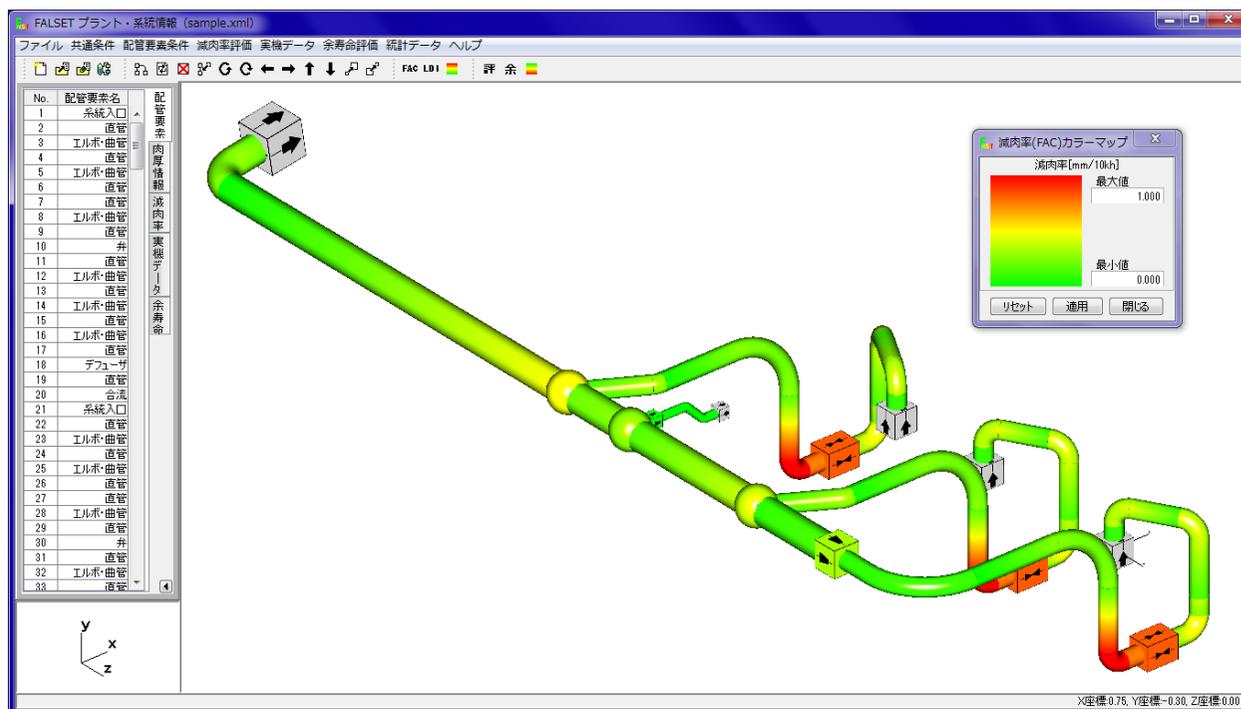


各部位の形状影響評価

◆ FALSETでの配管レイアウトの影響評価

- 流体力学因子の評価手法は詳細なCFDの実施ではなく、配管レイアウトに沿った1次元的な簡易評価手法(形状係数)を使用して適用

FAC予測ソフトウェアの開発 4/4



減肉予測ソフトウェアFALSETによる減肉率予測結果表示の例

FALSETによる残余肉厚予測の例

- ◆ 国内プラントデータを用いた検証・妥当性確認を実施中
- ◆ 肉厚検査の対象範囲や実施時期の最適化に、将来的に活用