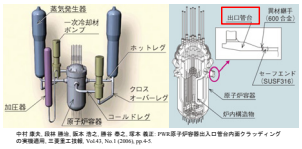
原子力発電機器における応力改善工法の長期安全性評価のための基盤技術開発

大阪府立大学　柴原 正和、木谷 悠二、生島 一樹
日本原子力研究開発機構　秋田 貢一、鈴木 裕士、井川 直樹
発電設備技術検査協会　古川 敬、西川 聡

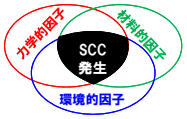
原子力発電の安全性の向上

- 原子力発電は重要なベースロード電源
- 原子力技術の安全性向上が喫緊の課題

原子力発電におけるSCC (Stress Corrosion Cracking)



- 原子炉圧力容器の出入口管台部において1次冷却水系の応力腐食割れ(PWSCC)の発生が報告
- き裂の進展に伴い**重大事故につながる恐れ**



- 力学的因子　引張り応力下で発生
- 材料的因子　合金において発生
- 環境的因子　溶存酸素、塩化物イオン等

3因子が重畳する場合にSCCが発生

溶接施工後の残留応力分布の改質によりSCCを防止可能

ピーニングによる溶接残留応力の改質

- ショットピーニング、ウォータージェットピーニング、レーザーピーニング等
- 衝撃力の負荷により圧縮残留応力の付与しき裂進展を防止→PWSCCの防止

http://www.gt-ind.com.sg/services_inhouse.html

http://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/maintenance/advance/alleviation/index.html

https://www3.toshiba.co.jp/power/pic/secret/materials/detail_04.html

本研究の目的

実機の溶接過程、ピーニング施工、温度、荷重等の再現

実工程を模擬できるFEM解析手法の開発

想定される効果

- **SCC発生可能性の事前検討による原子力安全プラントの安全性向上**
- **圧縮残留応力の持続性が担保されることによる保守管理コストの大幅な削減**

研究体制

①実機模擬試験体製作（発電技検）

- 同材、異材の配管形状溶接継手を想定
- オーステナイト系ステンレスと炭素鋼
- 突合せティグ溶接後にピーニング施工

配管模擬試験体イメージ

溶接時温度データ等

試験体

②その場中性子残留応力測定（原子力機構）

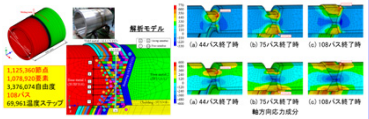
- ジャケットヒーター、応力負荷機構を製作
- X線回折法により表面残留応力測定
- 中性子回折法により高温、荷重下残留応力測定

工学中性子回折装置 TAKUMI/J-PARC　　製作する応力負荷機構の概念図

検証用残留応力データ等

③ 理想化陽解法FEM解析手法の高度化（大阪府大）

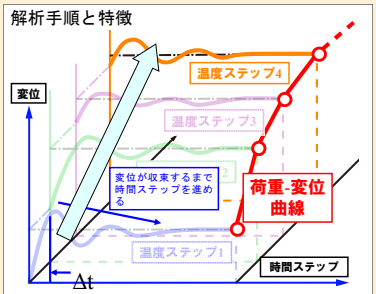
- 実験結果を用いてピーニングの力学モデルを検証し、妥当性検討
- 溶接、ピーニング、実機環境(熱サイクル、荷重）の一連の工程をシミュレーションできるように高度化し、実機における圧縮残留応力の長期持続性を評価



理想化陽解法FEMによる1パス毎の応力解析例

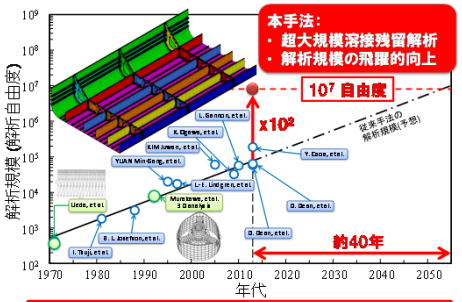
基盤解析技術 － 理想化陽解法FEMの概略

解析手順と特徴



- 各温度ステップにおいて収束計算を行い静的平衡状態を得た後に次の温度ステップに進む
- 高速・省メモリな解析を実現
- 並列化に対して高い適用性

理想化陽解法の効果



実機レベルの溶接残留応力の予測　溶接力学分野における先駆的研究

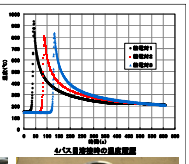
本研究　理想化陽解法を活用し実機におけるピーニングの残留応力場改質効果を予測

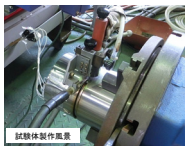
これまでの研究成果

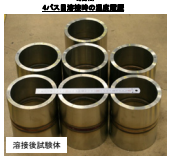
①実機模擬試験体製作

同材・異材継手試験体の製作

- 溶接材料にY316Lを用いてTIG溶接を実施
- 同じ溶接条件で10層10パスで積層
- 溶接時に温度測定を実施



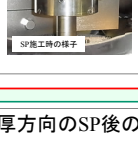

試験体製作風景


溶接後試験体

ショットピーニング試験体の製作

- 整形加工後の試験体4体について2体を外表面に，残り 2体を内表面にSP施工
- 溶接部を中心に約50 mmの範囲についてSPを実施

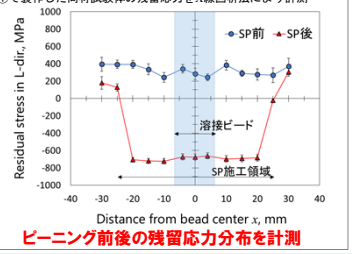
外表面	処理設備	インデペ
	投射材	ステンレスタングカットワイヤー φ0.6 mm, Hv468
	投射速度	80 m/s
	テーブル回転数	12 r.p.m.
	投射時間	280 s
	カバレッジ	200%
	アークハイト値	0.285 mm
内表面	処理設備	ニアンペ
	投射材	ステンレスタングカットワイヤー φ0.8 mm, Hv468
	投射圧力	0.4 MPa
	ノズル径	φ9 mm
	投射量	9.4 kg/min
	テーブル回転速度	30 r.p.m.
	投射時間	120 s×3回打ち(15 mm間隔)
	アークハイト値	0.285 mm


SP施工時の様子

②残留応力測定

ショットピーニング前後での残留応力計測

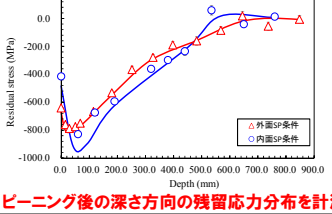
①で製作した同材試験体の残留応力をX線回折法により計測



ピーニング前後の残留応力分布を計測

板厚方向のSP後の残留応力分布の計測

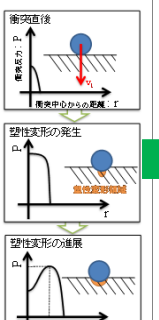
- ①と同条件のSP施工後の平板の残留応力をX線回折法により計測
- 外面条件と内面条件の違いについて検討



ピーニング後の深さ方向の残留応力分布を計測

③ 理想化陽解法FEM解析手法の高度化

荷重履歴の概略



ピーニング時の等価荷重モデルの構築

荷重分布関数

$$f(\rho,\tau)=\frac{a(\rho,\tau)}{\int_0^1 a(\rho,\tau)2\pi\rho\,d\rho}$$

$$a_i(\tau)=A_i\left(\frac{K}{1+\exp\{\gamma K(\tau_0-\tau)\}}\right)^{-1}$$

- 荷重分布の時間履歴を定義
- 6次関数の係数を時間変化
- 係数はロジスティック曲線に基づき変化

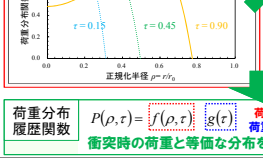
$a(\rho,\tau)=a_6\rho^6+a_5(\tau)\rho^5+a_4\rho^4+a_3\rho^3+a_2$

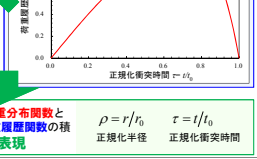
荷重履歴関数

$$g(\tau)=b\sin\left(\frac{\tau^7+2\tau}{3}\pi\right)$$

$$b=\frac{m(v_2-v_1)}{t_0\int_0^1\sin\left(\frac{\tau^7+2\tau}{3}\pi\right)d\tau}$$

- 荷重の時間履歴を定義
- 荷重の時間積分(力積)がショットの衝突前後の運動量変化と等しくなるように設定





荷重分布履歴関数

$$P(\rho,\tau)=f(\rho,\tau)\,g(\tau)$$

荷重分布関数と荷重履歴関数の積

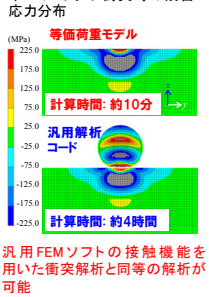
衝突時の荷重と等価な分布を表現

$\rho=r/r_0$　正規化半径

$\tau=t/t_0$　正規化衝突時間

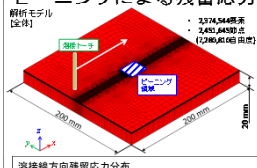
等価荷重モデルの検証

単一ショット衝突時の残留応力分布



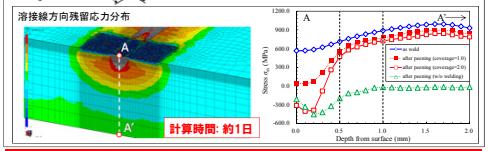
汎用FEMソフトの接触機能を用いた衝突解析と同等の解析が可能

ピーニングによる残留応力改質効果の解析



解析条件

- ビードオンプレート後の残留応力分布のショットピーニングによる変化を解析
- 溶接条件: 180A, 10V, 3.33 mm/s, 70%
- ピーニング: 3000発のショットが衝突するまで(Coverage=2)を解析
- 衝突条件: 力積1.48x10⁻³Ns(ABAQUS解析の結果より)、衝突時間1.0μs、半径0.4mm
- 使用計算機：Core i7 3.4GHz, 64GB memory, GeForce GTX TITAN Black (GPU並列化を使用)



ピーニング時の応力挙動を解析可能

今後の展望

- 中性子回析装置を用いたオペレーション時の温度履歴および荷重履歴を模擬した環境下での応力計測
- 実験による残留応力計測結果と等価ピーニング荷重モデルの妥当性検証と多重衝突の考慮による等価荷重モデルの高度化
- 製作した試験体を模擬した溶接残留応力解析とそれに続くピーニング時の応力挙動の解析および残留応力計測結果との比較
- FEM解析を用いたX線残留応力計測時のパラメータ(D0)の同定および電解研磨時の応力解放が残留応力計測に及ぼす影響の検討