



大阪大学

*Osaka University*

*Joining & Welding Research Institute*

# 原子力システム研究開発事業 成果報告会

## 原子炉自在設計のための テールロード溶接シミュレーション システムの構築

大阪大学 接合科学研究所

大阪大学大学院 工学研究科

日本原子力研究開発機構

門井浩太 (代表者)

岡野成威

青木聡

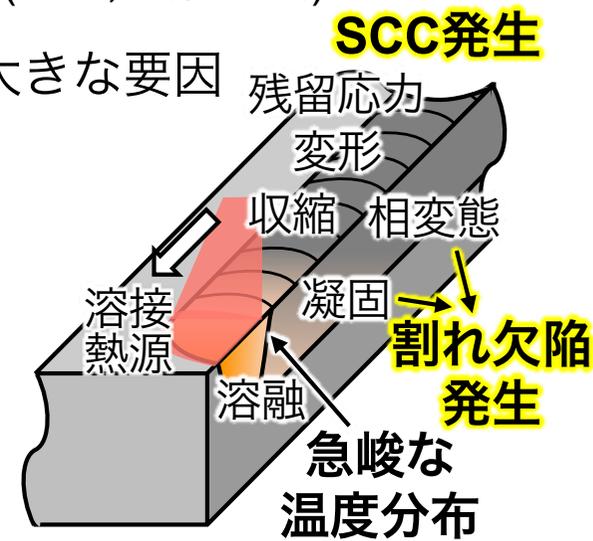


## 革新炉・新型原子炉設備の高機能化・さらなる安全性の向上

- 溶接性など製造工程に律速されない**自由度の高い設計**が必要不可欠
  - ⇒ 材料の適材適所・素材や部品の多種多様な組合せ ⇒ **異種材料溶接**の適用拡大 (以下, 異材溶接)
- 原子炉設備の**製造工程の半数近くが溶接**
  - ⇒ 構造体の一部となる**溶接部の品質**が, **性能を決める大きな要因**

### 溶接は代表的な特殊工程(ISO9001)

- ✓ 急速な加熱冷却に伴う非平衡な状態変化
  - ⇒ 溶接部特有のミクロ組織形態・残留応力負荷
- ✓ **溶接割れ**や**応力腐食割れ** (以下, SCC) が発生, **損傷の起点**
  - ⇒ 原子炉の長期安全性のため, 発生防止は必要不可欠
  - ⇒ 溶接割れ, SCCの発生現象は学術的に未解明
- ✓ **異材溶接**では化学組成の大幅な変化等により, 諸現象は一層複雑化



**【目的】**  
 設計段階から異材溶接プロセス, 溶接割れ性, 耐SCC性までをワンスルーで予測可能なテラード溶接プロセスシミュレーションシステムを構築  
 ⇒ 自在な設計(最適プロセス条件や材料の選択), 割れ・SCC発生の科学的管理



# 研究目標

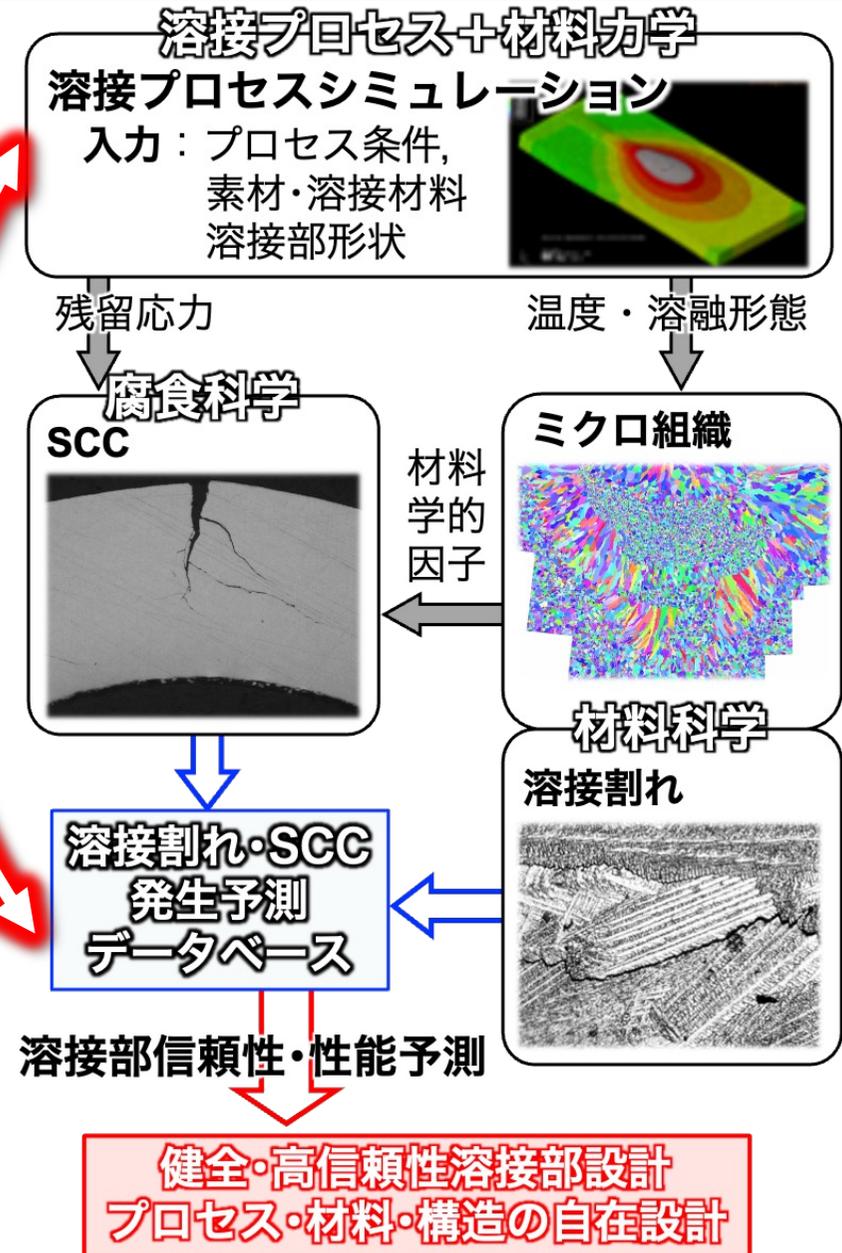
## テラード溶接プロセス シミュレーションシステム

CAE解析：熱伝導解析と熱弾塑性解析  
溶接割れ・SCC発生予測データベース

逆問題的解析により，効率的かつ網羅的  
探索に基づく，溶接プロセス条件や適用  
材料の最適化に寄与

### 【実施内容】

1. 溶接割れ感受性評価試験と試験片作製
2. 溶接プロセスシミュレーションモデルの構築
3. 応力腐食割れ感受性評価試験



健全・高信頼性溶接部設計  
プロセス・材料・構造の自在設計

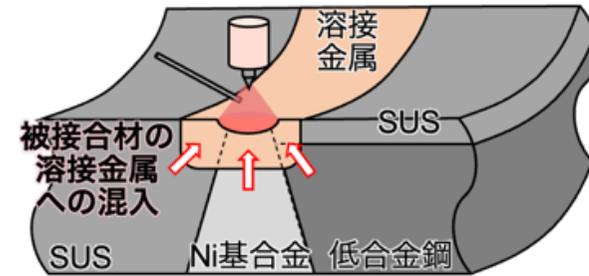


# 試験片化学組成の検討

原子炉構造物製造で想定される被接合材料 (母材)や溶接材料の組合せの範囲における化学組成での検討

### 【考慮すべき事項】

- 材料の組み合わせ
- 母材の溶接部への希釈



原子炉構造物で想定される異材溶接

### ➤ 対象材料の化学組成範囲

- ✓ 母材: A533B, SUS316L, 600合金
- ✓ 溶加材: SUS309L, 82合金

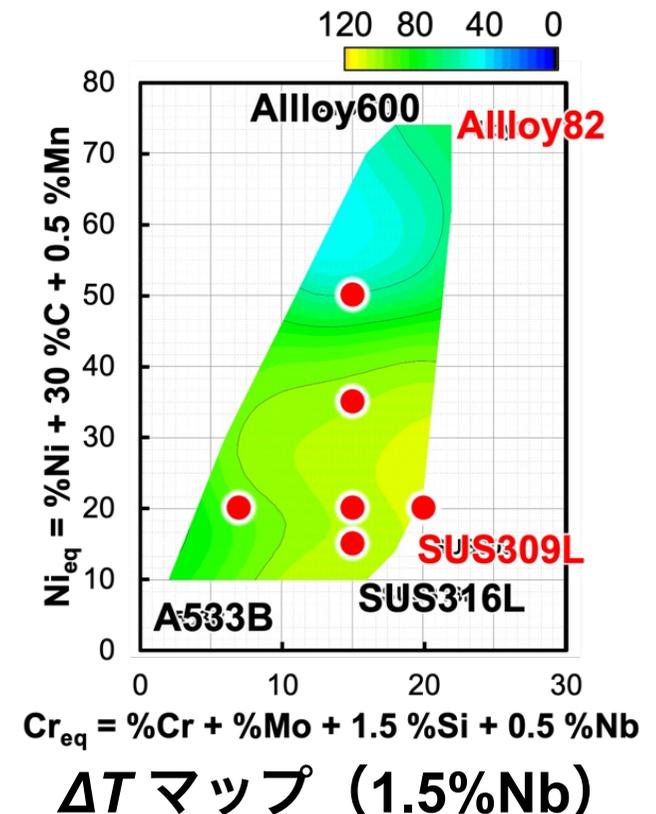
### ➤ 熱力学計算条件

異材溶接時の希釈に伴う化学組成変化を考慮し, Ni, Cr, Nbを変化させた熱力学計算により凝固温度範囲  $\Delta T$ を導出 (溶接凝固割れは固液共存温度域で発生)

$$\Delta T = T_L - T_S \quad (T_S: \text{固相率}95\%)$$

選定した任意化学組成:

- ✓  $Ni_{eq}$ : 20一定,  $Cr_{eq} = 7.5, 15, 20$
- ✓  $Cr_{eq}$ : 15一定,  $Ni_{eq} = 15, 35, 50$
- ✓ 1.2%Nb含有の有無の計12種類化学組成





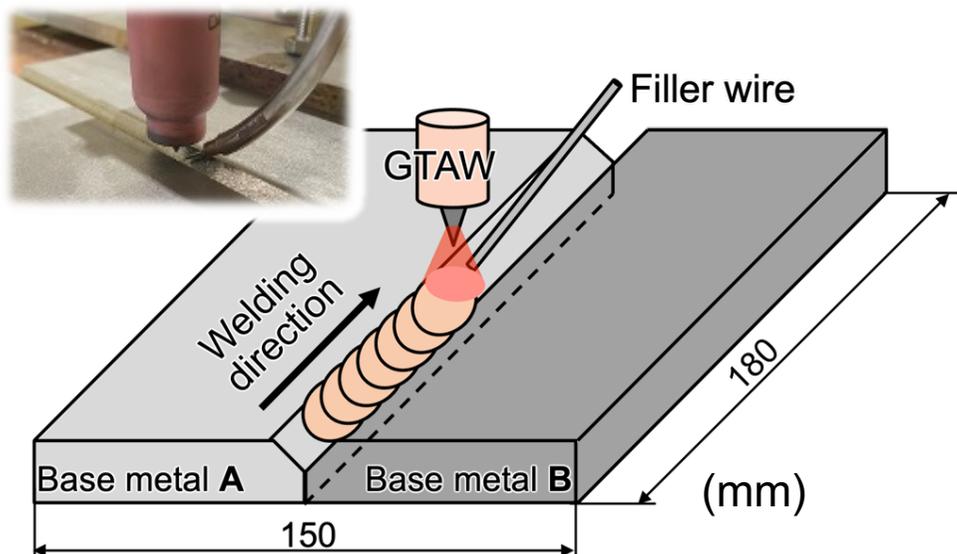
# 異材溶接を模擬した試験片の作製

## 任意化学組成試験片の作製(鑄造)

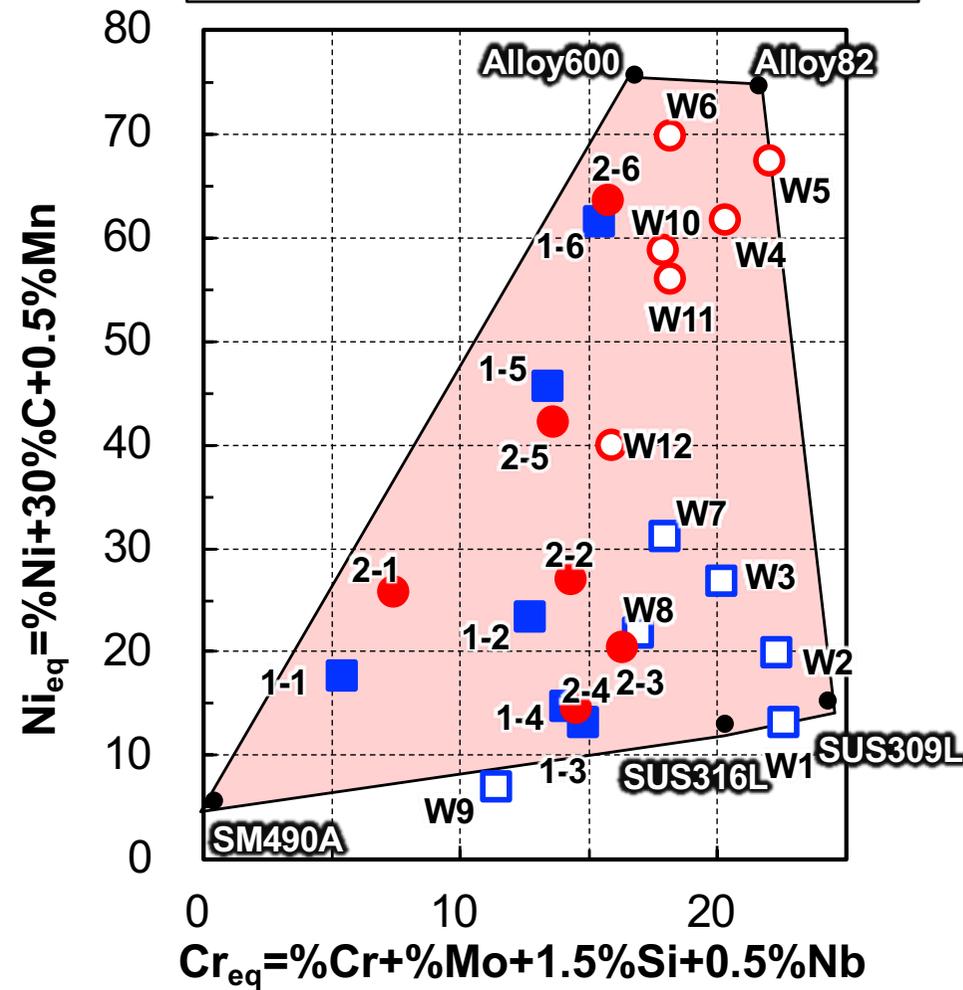
- 出発材料: 鉄鋼材, Ni基合金, 添加元素
- 真空溶解炉で溶製後放電加工で切り出し  
⇒R3年度導入

## 異材溶接試験片の作製

- 母材: SM490A, SUS316L, 600合金
- 溶加材: SUS309L, 82合金
- TIG溶接し, 放電加工で切り出し  
⇒R5年度導入



Nb	Non-Nb		
○	□	Weld specimen (1・2 - 1~6)	
●	■	Cast specimen (W1~12)	



試験片化学組成の分布

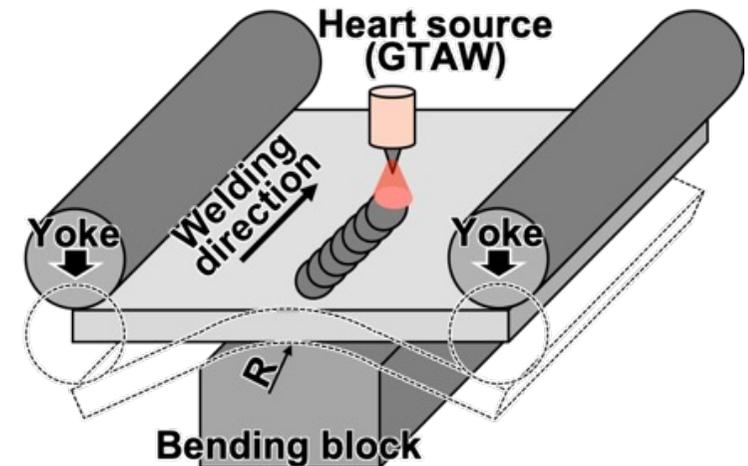
# 溶接割れ感受性評価 ～トランスバレストレイン試験～

溶接中に試験片表面に曲げひずみを瞬間的に付与し，高温割れを強制的に発生させる。

(アーク消弧と同時ひずみ付与)

瞬間的に割れの発生・伝播までが完了

曲げブロックの曲率半径で公称ひずみを変化



## 評価項目

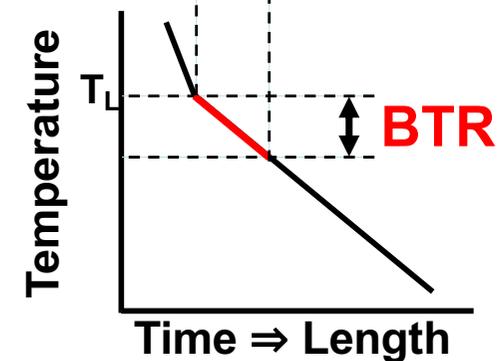
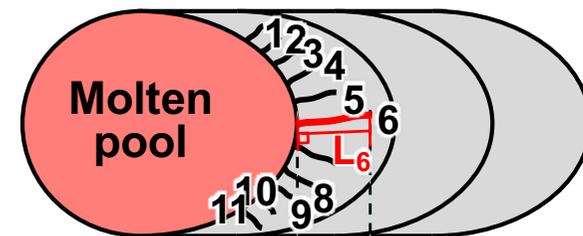
### ✓ 割れ数，長さ測定

最大割れ長さ (MCL) =  $L_6$

総割れ長さ (TCL) =  $L_1 + L_2 + L_3 + \dots$

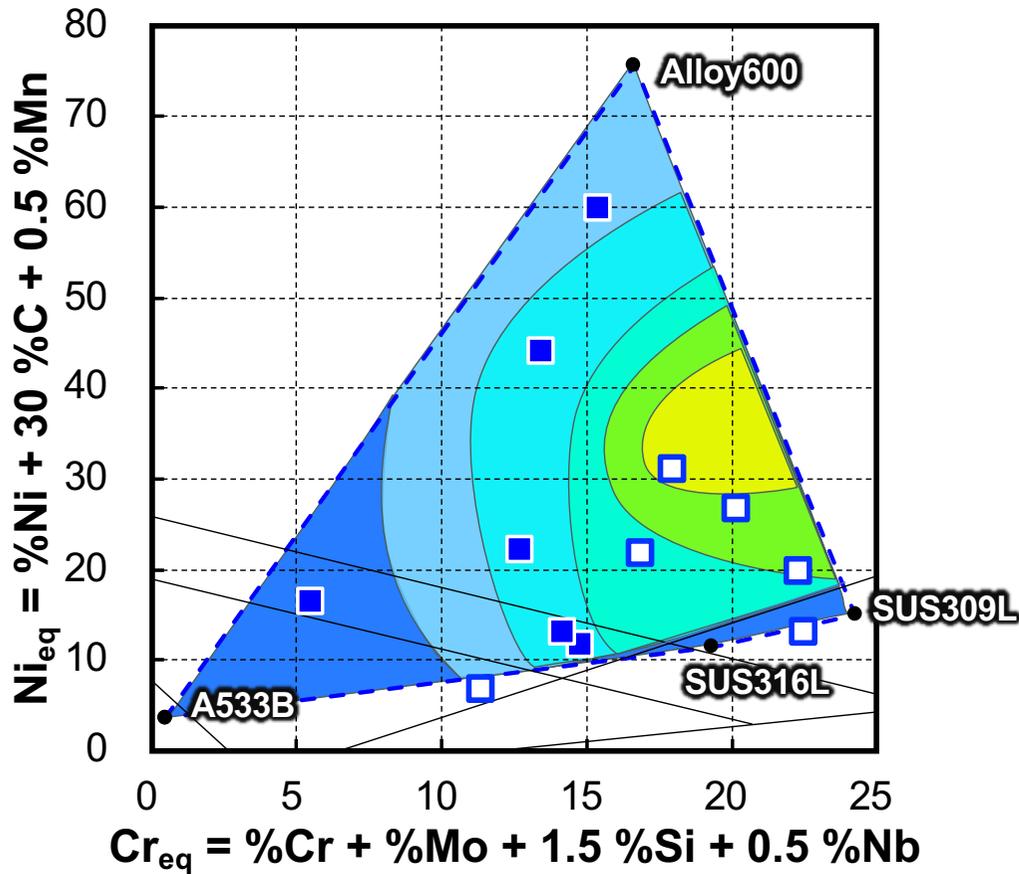
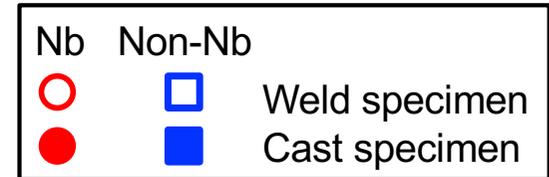
### ✓ 温度履歴の計測

⇒ 最大凝固割れ長さを **BTR** へ変換

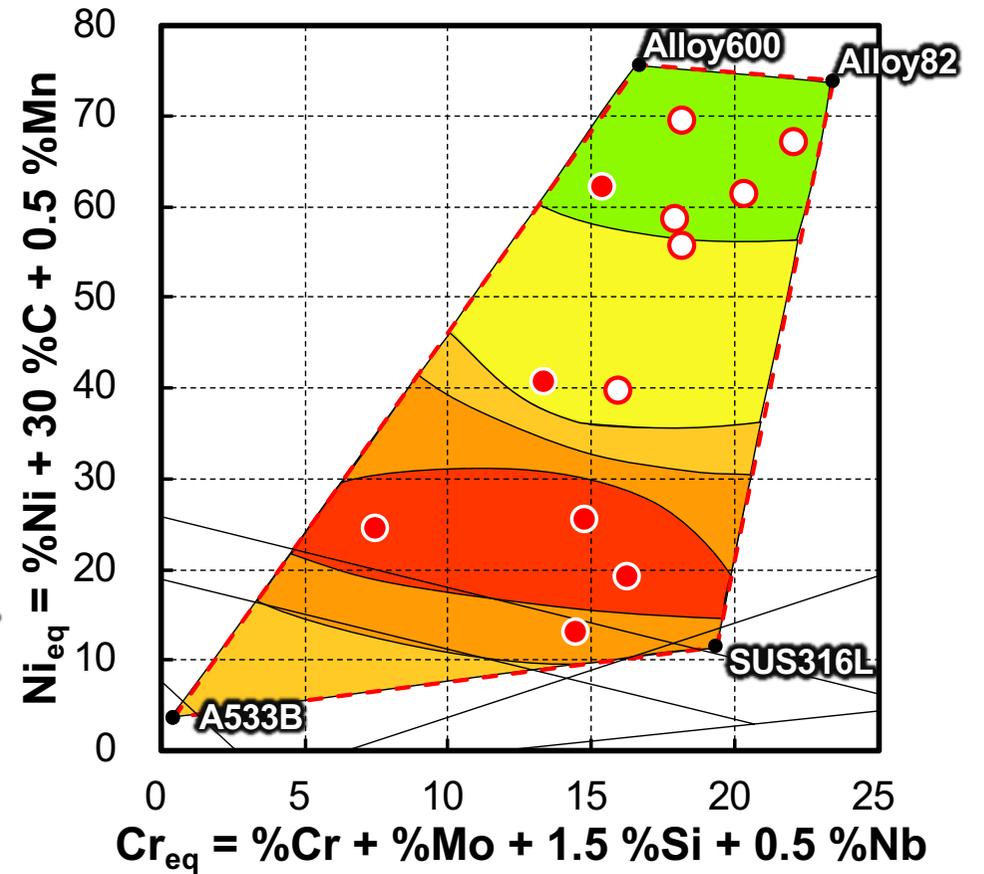




# 割れ感受性ハザードマップ



Nbなし

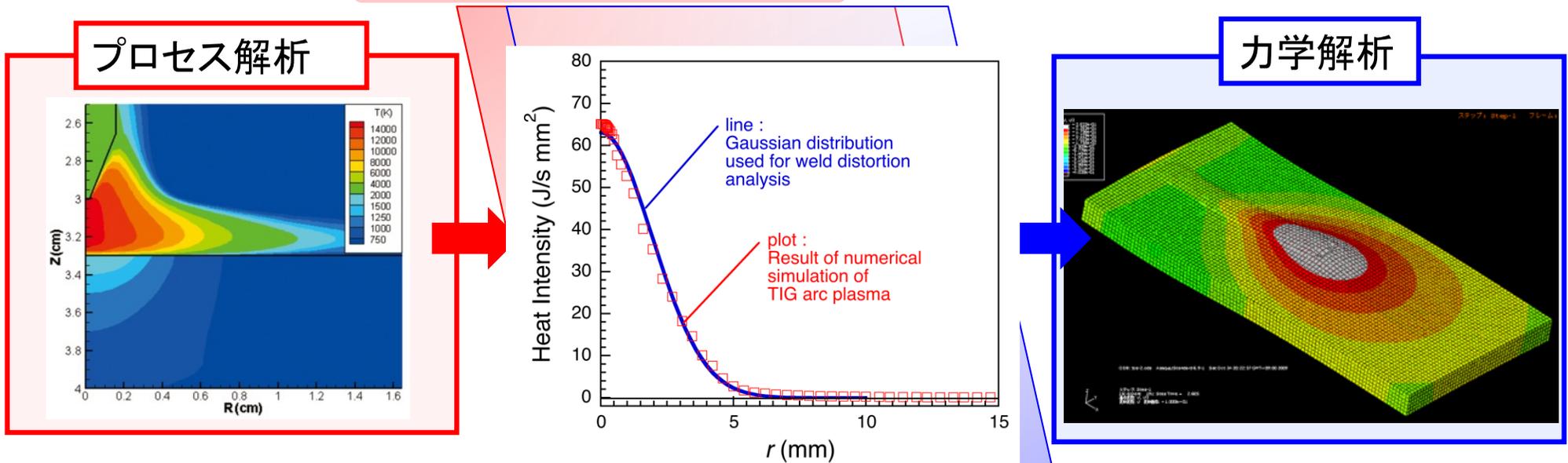


Nbあり

# (2) 溶接プロセスシミュレーション モデルの構築

溶接プロセスの物理を考慮したFEMによる3次元熱伝導解析ならびに熱弾塑性解析を適用する。はじめに商用ステンレス鋼(SUS316Lなど)を用い、(1)で得られた温度分布・履歴と溶融形状から熱源モデルを構築した後、異材溶接を対象とした化学組成へと拡張する。計算される残留応力を実験値との比較により広範囲な化学組成での解析の妥当性検証や高度化を検討する。

アーク・プラズマから母材への熱輸送特性

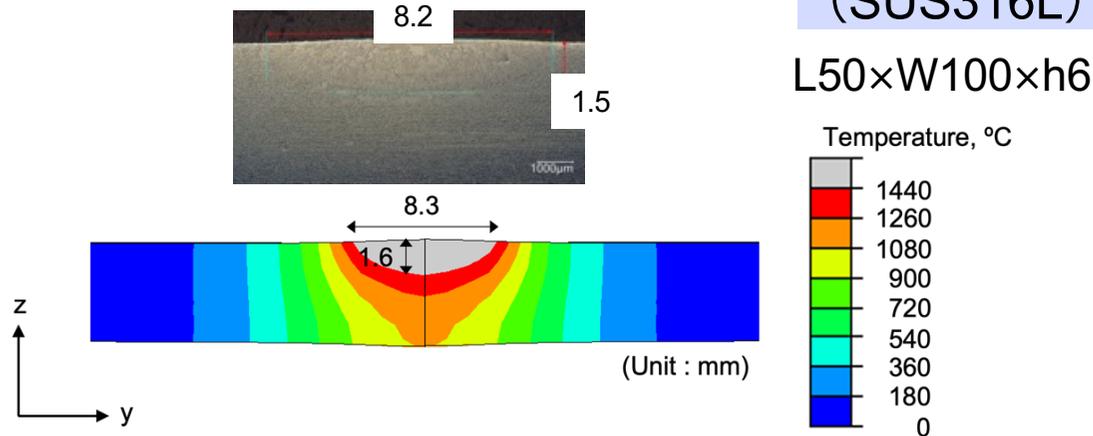


- 単位時間当りの入熱量,  $Q$  (J/s)
  - ガウス半径,  $R$  (mm)
- は溶接電流・アーク長に応じた設定
- \*  $Q=981$ (J/s),  $R=2.9$ (mm) @  $I=120$ (A)

ガウス分布

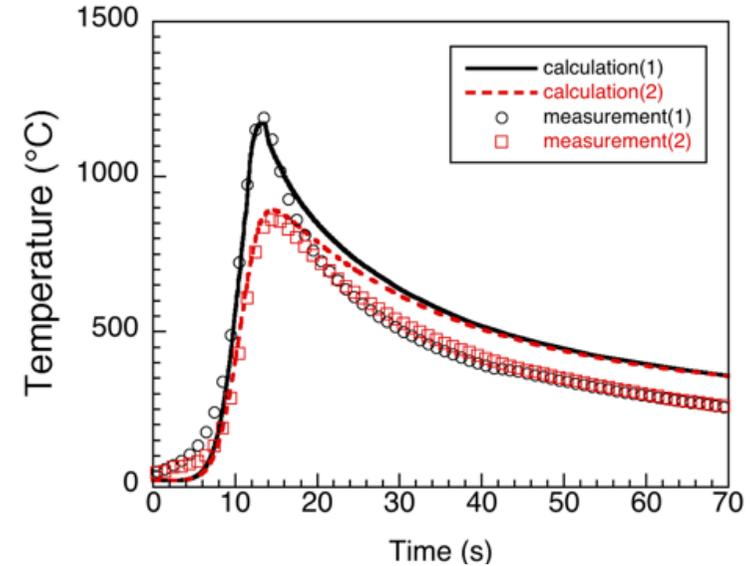
$$w(x, y, t) = \frac{Q}{\pi R^2} \exp\left\{-\frac{(x-vt)^2}{R^2}\right\} \exp\left\{-\frac{y^2}{R^2}\right\}$$

➤ 熱伝導解析結果 (溶融形状)

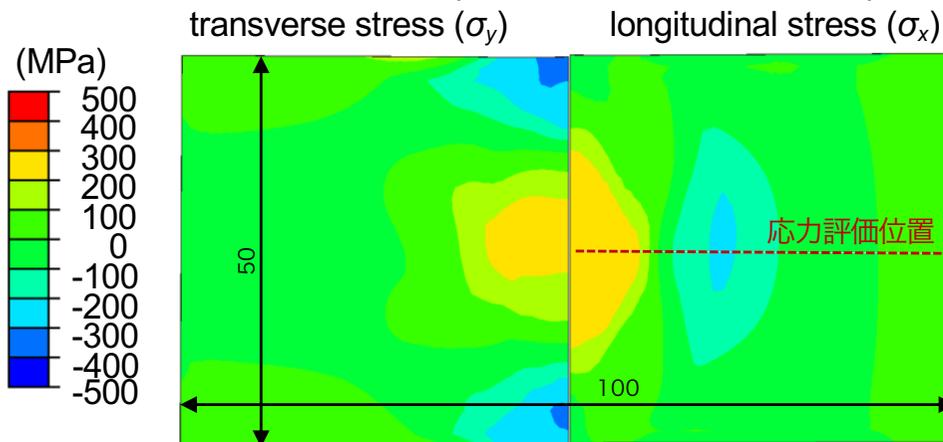


溶融形状・寸法, 温度履歴は共に良好に一致

➤ 熱伝導解析結果 (温度履歴)

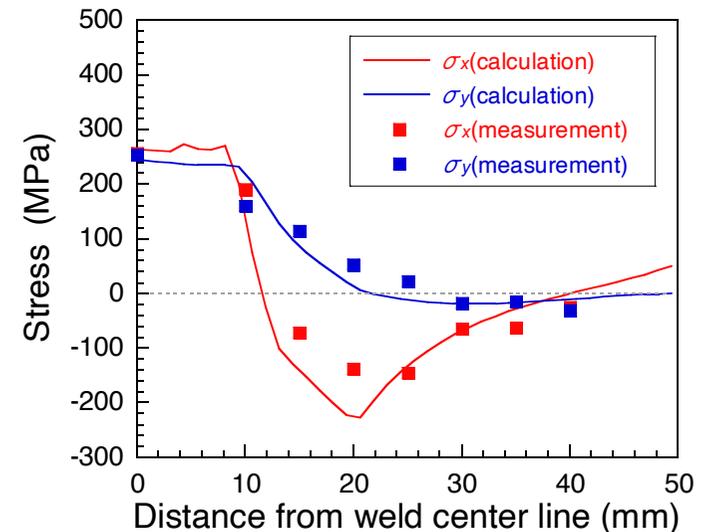


➤ 熱弾塑性解析結果 (溶接残留応力分布)



残留応力の分布は, ひずみゲージ法と良好に一致

➤ 計算と実験の比較(残留応力分布)



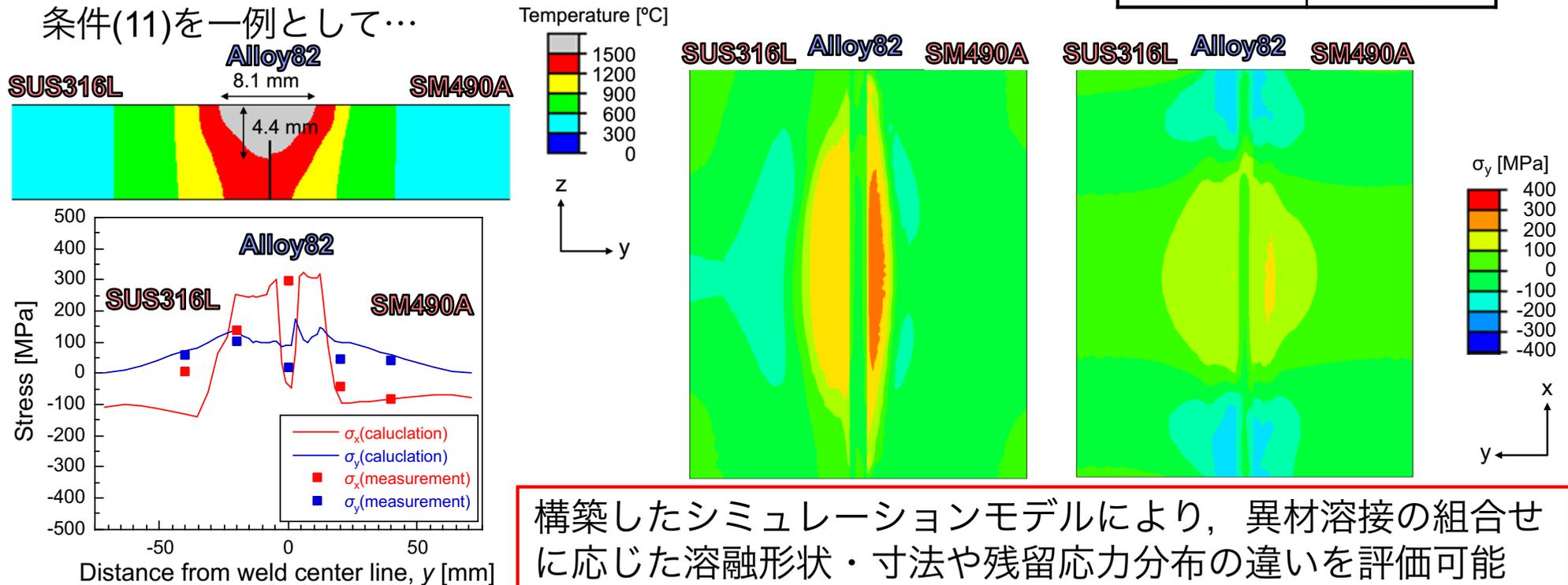
## 異材溶接での材料の組合せと開先形状

	母材	開先ベベル角	溶加材	開先ベベル角	母材
<b>W2</b>	SUS316L	45°	SUS309	45°	Alloy600
<b>W3</b>	SM490A	45°	SUS309	45°	Alloy600
<b>W4</b>	SM490A	45°	Alloy82	45°	SUS316L
<b>W6</b>	SM490A	45°	Alloy82	45°	Alloy600
<b>W7</b>	Alloy600	45°	SUS309	0°	SM490A
<b>W8</b>	SM490A	45°	SUS309	0°	Alloy600
<b>W11</b>	SUS316L	45°	Alloy82	0°	SM490A

## 各異材溶接金属に対応する 鋳造合金の材溶接組合せ

溶接試験片	鋳造試験片
W2	1-3
W3	1-3
W4	1-6
W6	1-6
W7	1-3
W8	1-3
W11	1-6

条件(11)を一例として...



構築したシミュレーションモデルにより、異材溶接の組合せに応じた溶融形状・寸法や残留応力分布の違いを評価可能

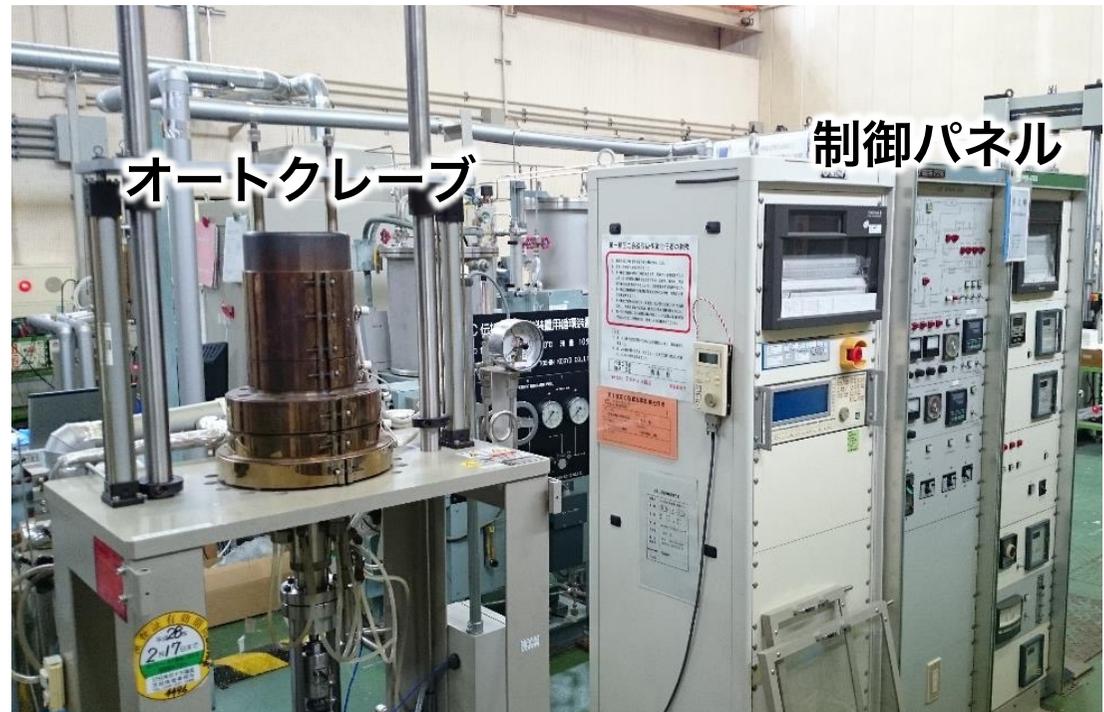


# (3) 応力腐食割れ感受性評価試験

【目的】 SCC感受性評価試験方法や適正条件を確立し，商用ステンレス鋼や任意に化学組成を変化させた試験片および種々の母材（被溶接材料）や溶接材料を用いた異材溶接試験に対しSCC試験を行い，化学組成とSCCの関係を調査するとともに，BTRのハザードマップを導出する。

## 環境条件 (BWR水質想定)

- ✓ 試験温度： $288 \pm 1$  °C
- ✓ 溶存酸素濃度：8 ppm
- ✓ 導電率
  - 入口側：0.057  $\mu\text{S}/\text{cm}$
  - 出口側：0.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下
- ✓ 試験時間：  
1000時間 / 1試験



高温高圧水ループSCC試験装置系外観写真

## 【令和3年度成果】

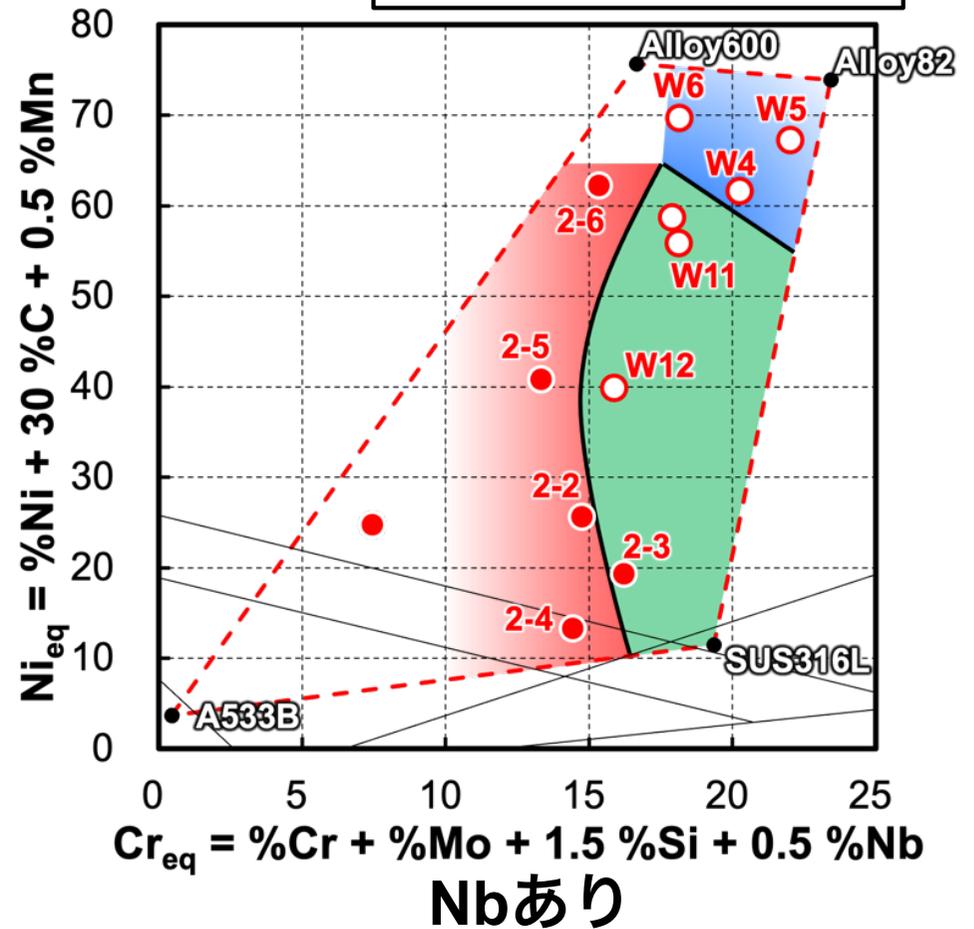
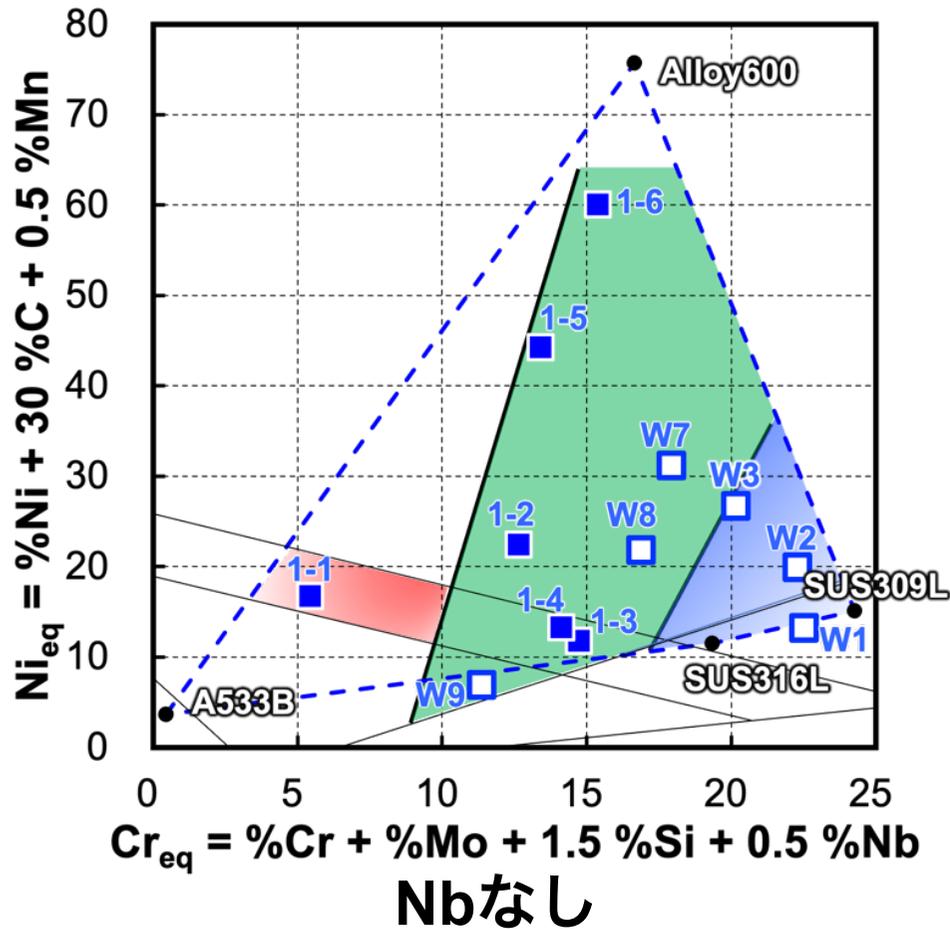
- 軽水炉炉内環境想定水質中で材料間のSCC発生感受性の相対的評価を効率的に行うSCC試験方法・条件の適正化を実施し，SCCき裂を発生させることに成功



# SCCハザードマップ

SCC susceptibility  
high    low

Nb	Non-Nb	
<span style="color: red;">○</span>	<span style="color: blue;">□</span>	Weld specimen
<span style="color: red;">●</span>	<span style="color: blue;">■</span>	Cast specimen



- SCCき裂長さとCr含有量などから整理⇒相対的なSCC感受性評価と領域分け
- 実験データの追加により確度の高いハザードマップが得られる



# 成果のまとめと今後の課題

## 【全体での成果のまとめ】

- 異材溶接の広範囲な化学組成に対し、実験による**溶接割れとSCCのデータベース**、**実験結果を基にした溶接プロセスシミュレーションモデル**を構築できた。実験と数値解析の融合により、従来にない予測法となり得ると考えている。
- 異材溶接で想定される広範囲な化学組成に対し、同一の試験片を用いた**溶接割れおよびSCCの割れ感受性のハザードマップ**などの**知識基盤**、 $Ni_{eq}$ 変化に伴うNbの偏析の影響の明確化など、**世界初の知見**を導出することができた。

## 【適用拡大・実用化に向けた今後の課題】

ハザードマップ、シミュレーションの高精度化  
⇒データの拡充（溶接割れ・SCC，材料物性値）

様々な材料の組合せや合金元素添加など幅広い化学組成での材料物性値，実験データの取得



- 高信頼性の溶接部設計のための溶接プロセス条件や材料選択の最適化
- 溶接部を特性が劣化する構造物の特異点（特殊工程）から脱却，多機能性を最大限に追求した，新型原子炉設備などの自在な設計・製造の実現

