

## 研究開発課題名

# 経年劣化耐性に優れた次世代ステンレス鋼 溶接金属の設計指針提案

研究代表者：阿部博志(東北大学)

研究分担者：源聡(NIMS)、堀内寿晃(北海道科学大学)  
宮崎 孝道(東北大学)

令和8年1月14(水)

# 背景 – 沸騰水型軽水炉(BWR)における応力腐食割れ(SCC)-

## BWRにおけるSCCの変遷

1970

1980

1990

2000

2010

2020

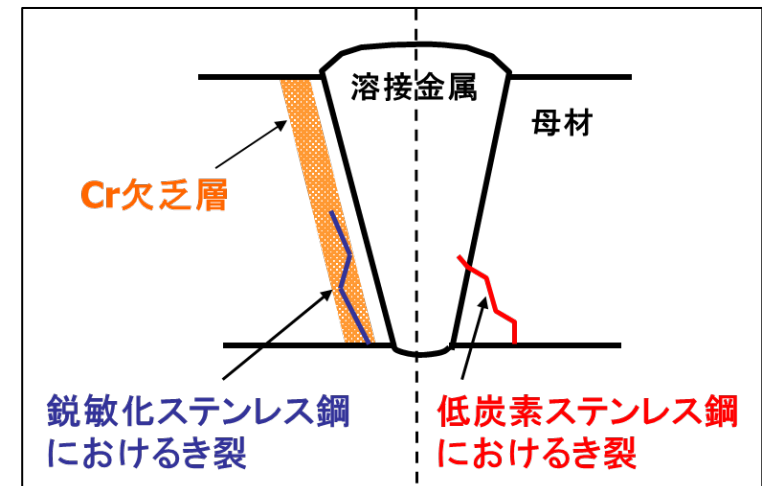
鋭敏化ステンレス鋼のSCC(304再循環配管溶接部)

Ni基合金のSCC(シュラウドサポート等)

非鋭敏化(低炭素)ステンレス鋼SCC(304L/316Lシュラウド、配管溶接部)

- ✓ 1970年代に、溶接熱影響による鋭敏化(Cr欠乏層の形成)が原因となるSCCを経験
- ✓ 鋭敏化感受性がない低炭素ステンレス鋼が開発され、恒久対策として実機に採用
- ✓ 1990年代から、低炭素ステンレス鋼制構造物にもSCCが顕在化(溶接部が多い)

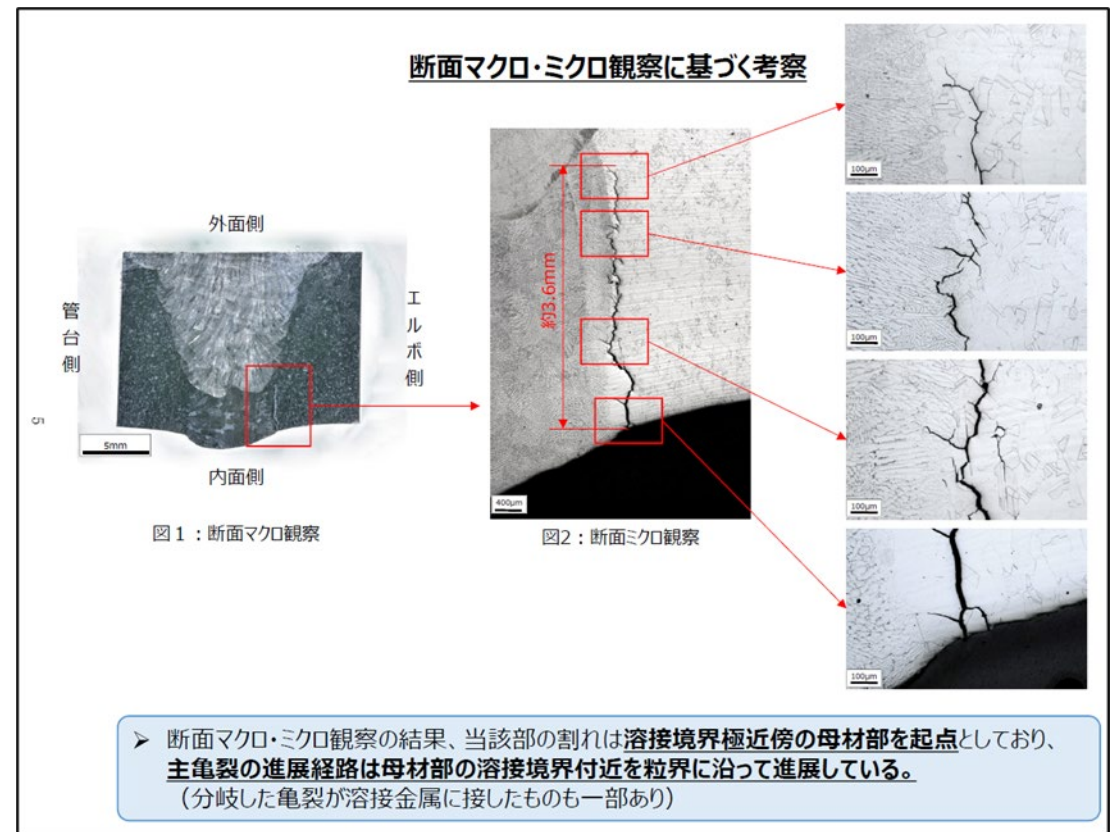
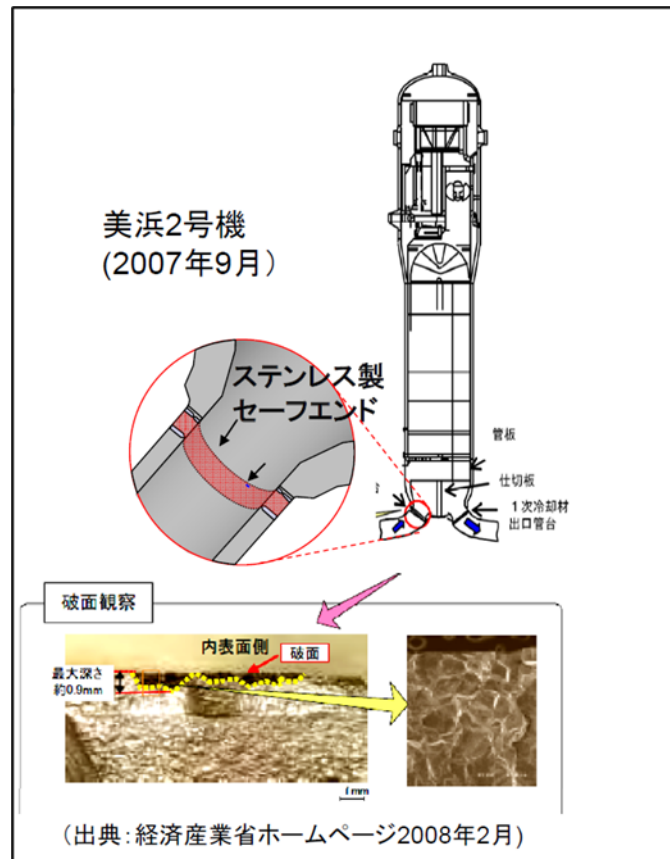
グラインダ加工等により導入された加工硬化層が、低炭素ステンレス鋼におけるSCCの原因であることが明らかになった。



# 背景 –加圧水型軽水炉(PWR)における応力腐食割れ(SCC)-

✓ PWRにおいては、Ni基合金においてSCCを経験してきているが、ステンレス鋼はSCC感受性を示さないと考えられてきた。しかしながら、近年ではステンレス鋼溶接部においてもSCC事例が報告されてきている。

- 美浜2号機 ステンレス製セーフエンドの溶接部(2007年)
- 大飯3号機 加圧器スプレイライン配管の溶接部(2020年)



# 背景 –PWR@フランスにおけるステンレス鋼溶接部SCC事例(2021～)



News releases Publications ASN's videos

News releases > Stress corrosion phenomenon detected on ...

## Stress corrosion phenomenon detected on the safety injection system of Civaux NPP reactor 1 – Shutdown of 1450 MWe reactors for inspections

Published on 21/12/2021 at 14:07



Information notice

On 21 October 2021, following ultrasonic inspections performed during the ten-yearly outage inspection of the Civaux NPP, EDF informed ASN that it had detected indications [1] on welds on the elbows of the pipes connecting the



News releases Publications ASN's videos

News releases > Stress corrosion phenomenon detected on ...

## Stress corrosion phenomenon detected on Civaux 1 and 2, Chooz B2 and Penly 1 reactors

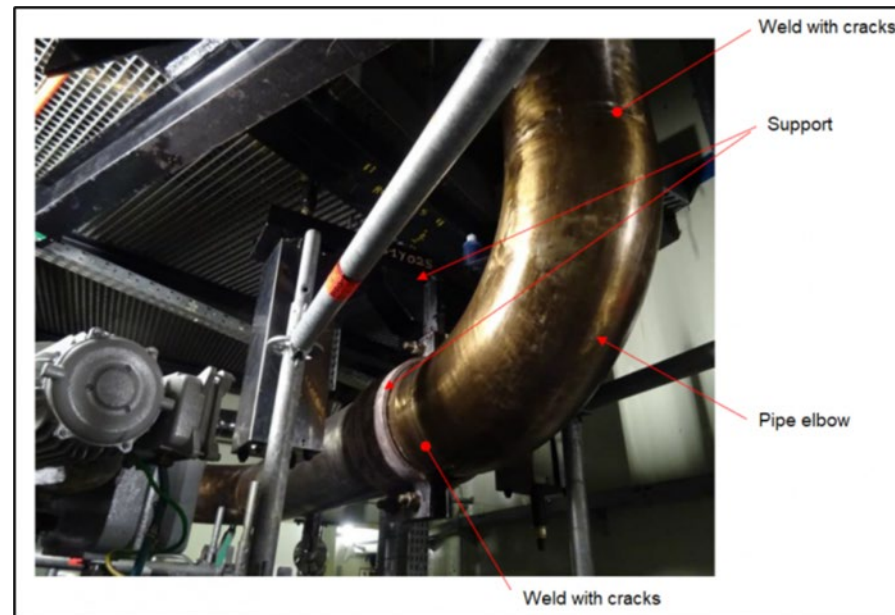
Published on 31/01/2022 at 11:21



Information notice

On 21 October 2021, following ultrasonic checks scheduled during the second ten-yearly outage of Civaux NPP reactor 1 (1450 MWe reactor), EDF informed ASN that it had detected indications[1] on welds on the elbows of the safety injection system piping[2] of the reactor's main primary system (see image below).

As Civaux NPP reactor 2 was the only 1450 MWe reactor not yet to have undergone these types of checks, EDF shut it down in November 2021 so that they could be carried out ahead

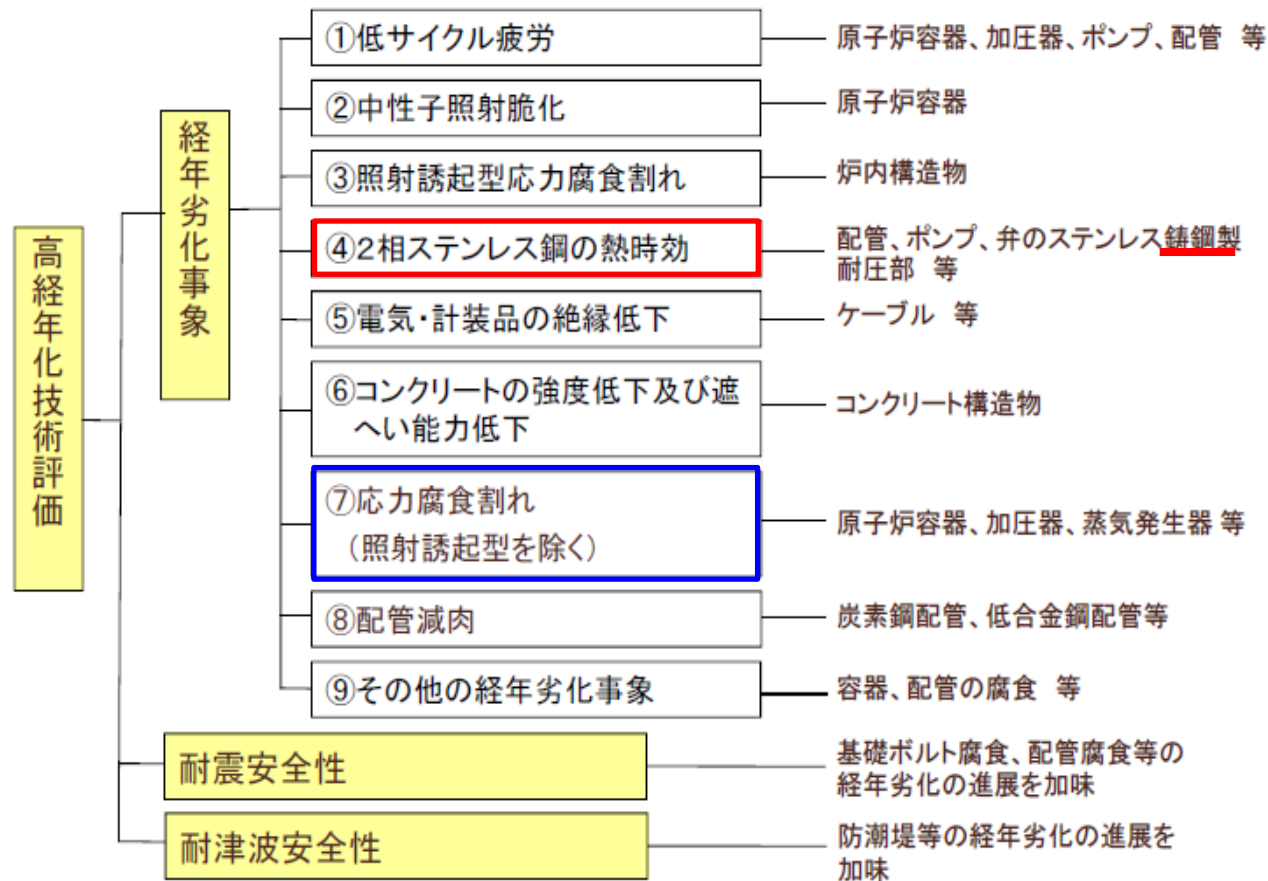


- ✓ ステンレス鋼製の安全注入系配管溶接部でSCC事例
- ✓ 複数の原子炉の同一系統でSCCが顕在化



- ステンレス鋼“溶接部”でSCCが健在化
- プラントの設備利用率に直結する問題

# 高経年化技術評価における経年劣化事象 (日本原子力学会 2014年春の大会(平成26年3月27日) 原子力規制庁発表資料に加筆)



- 2相ステンレス鋼の熱時効評価の対象として、ステンレス鋳鋼製機器・部位が挙げられている。運転温度での長時間の使用により、フェライト相でスピノーダル分解やG相の析出が生じ、脆化が生じることがある。
- ステンレス鋼溶接金属も、フェライト( $\delta$ )／オーステナイト( $\gamma$ )の2相組織。



# 研究目的

- 次世代炉・新型炉においても、軽水炉で多くの実績があるステンレス鋼が主たる構造材料として使用される可能性が極めて高い。すなわち、ステンレス鋼溶接継手がプラントに数多く存在し、広範な環境条件に曝されることが予想される。
- 現行の軽水炉と同様に、ステンレス鋼溶接部SCCが問題になる・未経験の経年劣化事象が顕在化する可能性が考えられる。これに対する備えは？

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属に数～十数%含まれる $\delta$ -フェライト( $\delta$ )相に着目して、将来顕在化する可能性が高い劣化モード(SCCならびに熱時効脆化)への耐性を有する次世代ステンレス鋼の設計指針を提案する。具体的には、以下の3項目を実施する。

(1)溶融凝固過程を考慮した熱時効硬化・ミクロ組織変化挙動評価

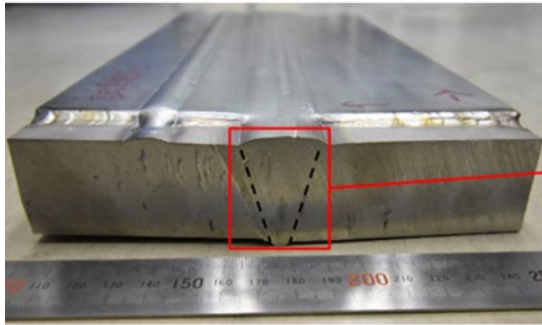
(2)データサイエンスを駆使した汎化性能の高いミクロ組織変化予測モデル構築

(3)応力腐食割れ進展抵抗性に優れた2相組織の創成

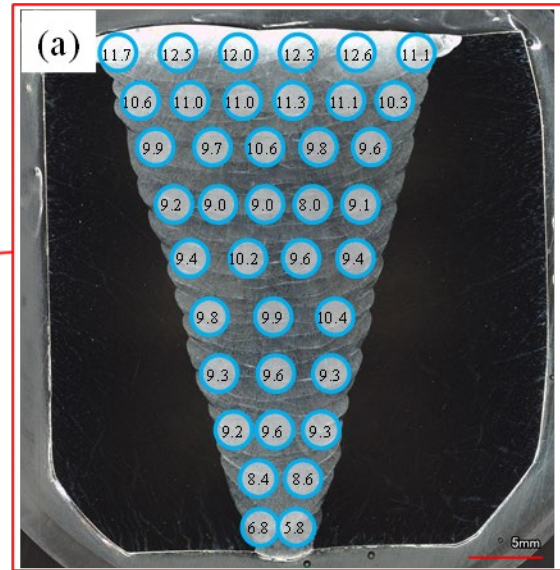
上記を達成することで、実機条件下における劣化事象の詳細メカニズムとその速度論に立脚したステンレス鋼溶接金属組織・組成提案の技術基盤が確立される。

# 研究成果: (1) 溶融凝固過程を考慮した熱時効硬化・ミクロ組織変化挙動評価(東北大)

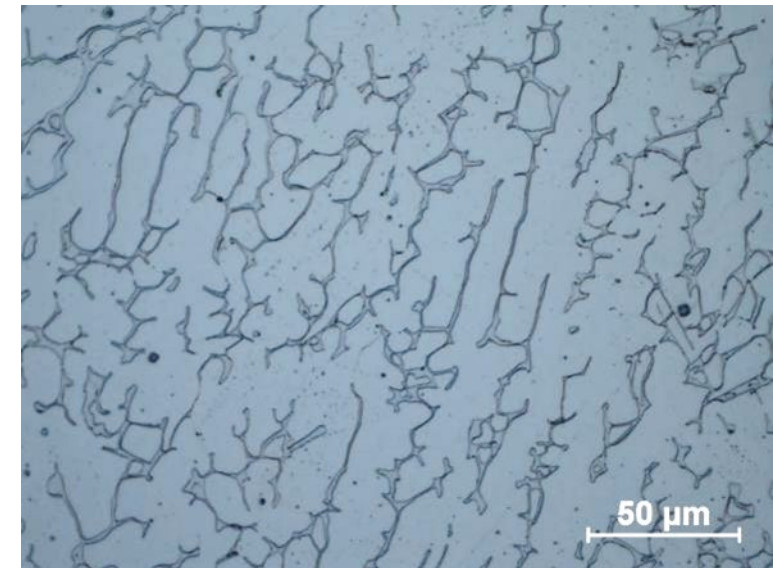
316L鋼TIG溶接接手を供試材として、溶接組織のキャラクタリゼーション、 $\delta$ フェライト相の初期硬さ、組成ならびに熱時効に伴う硬化・ミクロ組織変化挙動を明らかにした。



316L鋼TIG溶接接手



溶接金属のフェライト率、%



溶接金属のフェライト相分布

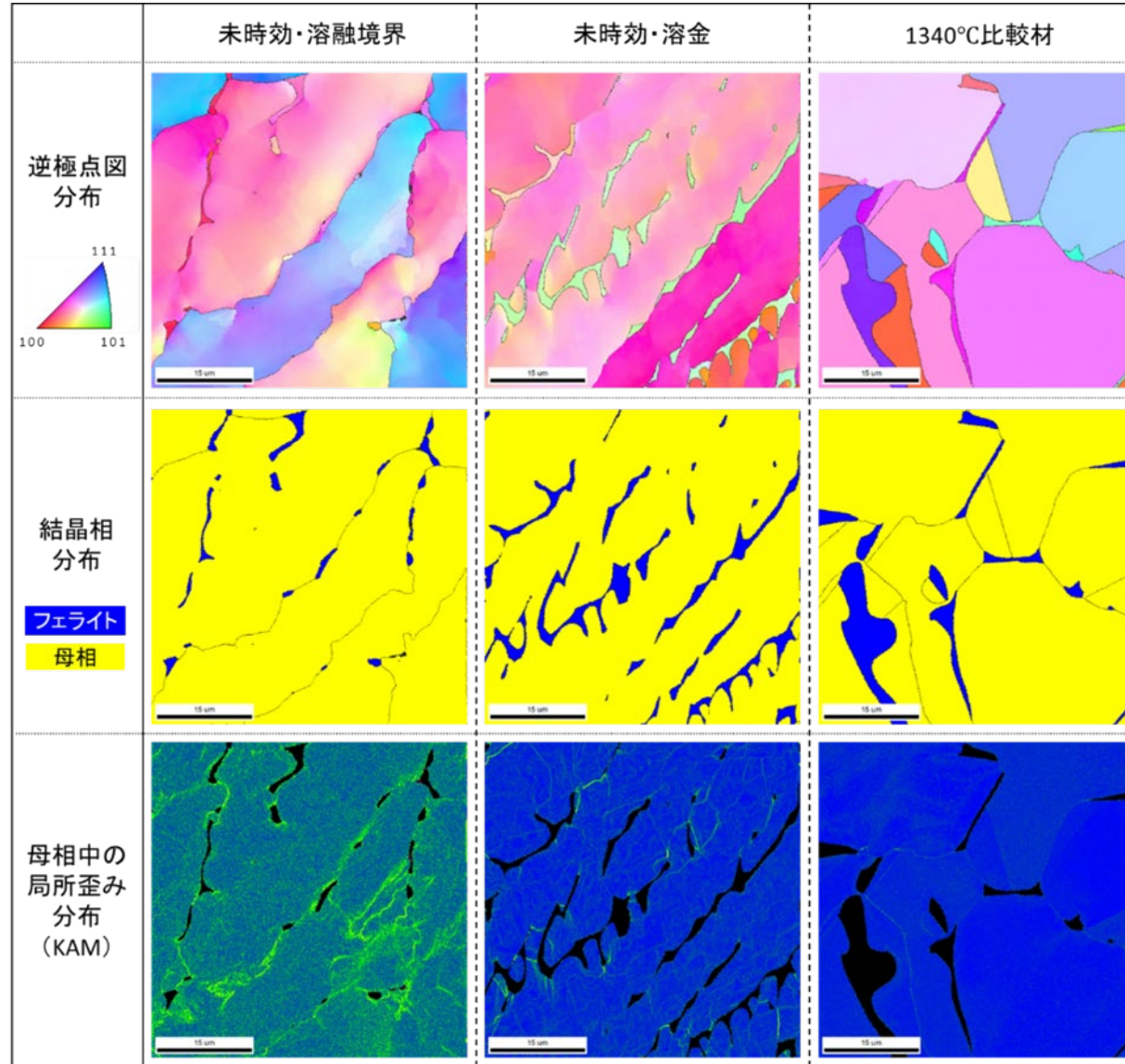
Chemical composition, wt%

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
316NG Base metal	0.013	0.49	1.60	0.024	0.001	12.77	17.28	2.61	0.101	Bal.
316L Weld metal	0.018	0.49	1.69	0.025	0.001	12.05	19.21	2.19	-	Bal.

0.046(下部)  
0.023(上部)  
分析値

# 研究成果: (1) 溶融凝固過程を考慮した熱時効硬化・ミクロ組織変化挙動評価(東北大)

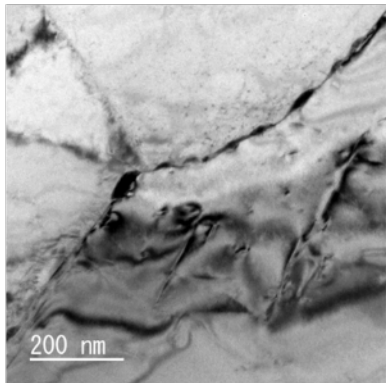
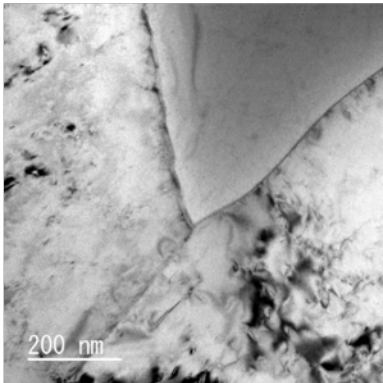
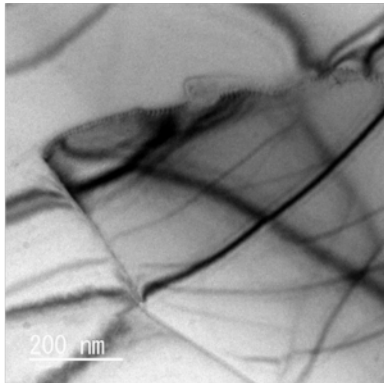
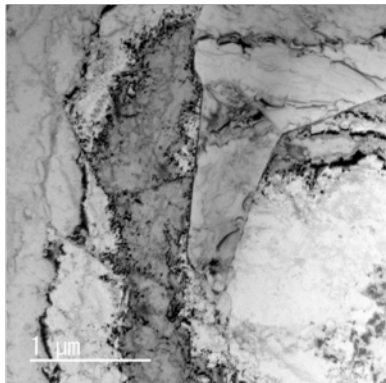
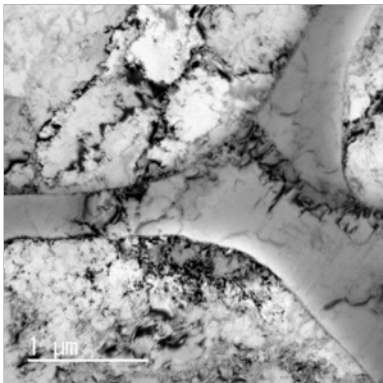
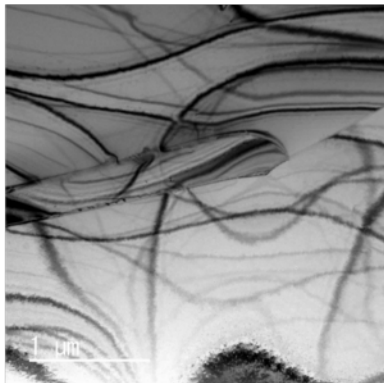
316L鋼溶接試料について、溶接金属中央部と溶融近傍の $\delta$ 相に分類するとともに、高周波誘導加熱(IH)処理により作製した粒界島状 $\delta$ 相について、種々のキャラクタリゼーションを実施した。





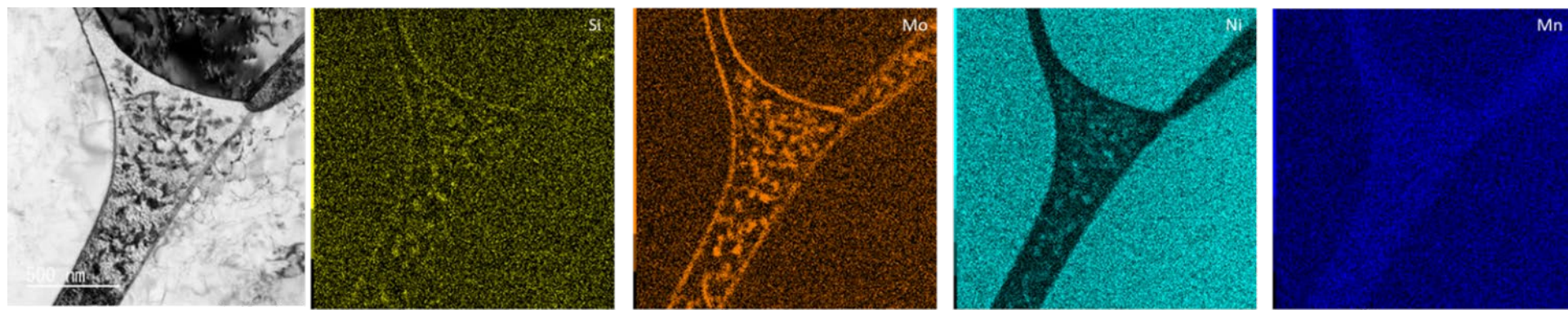
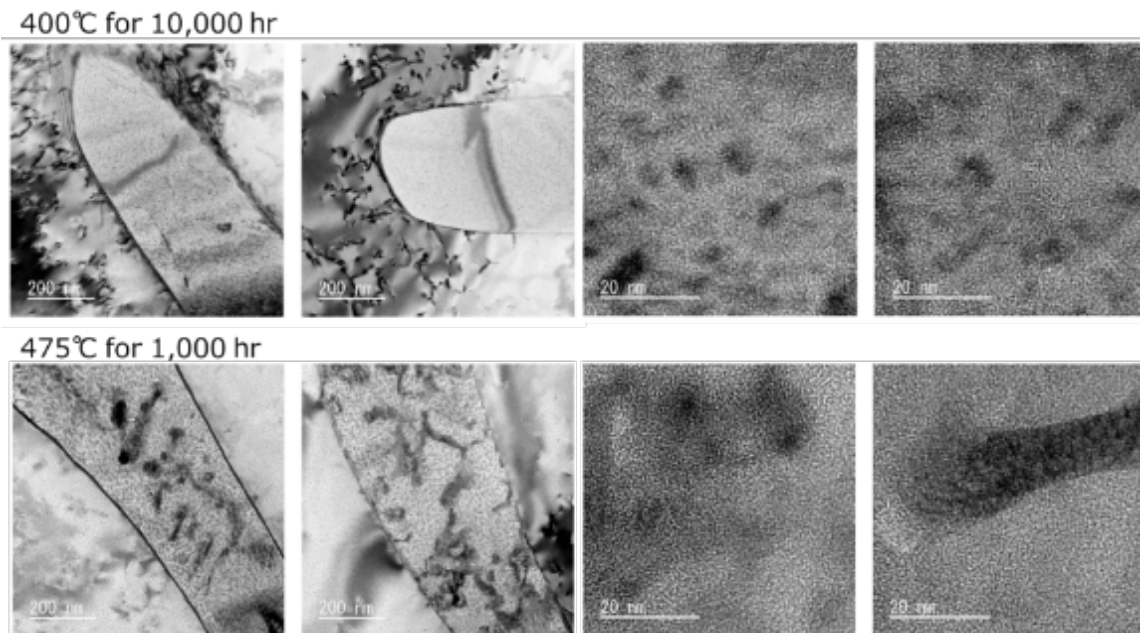
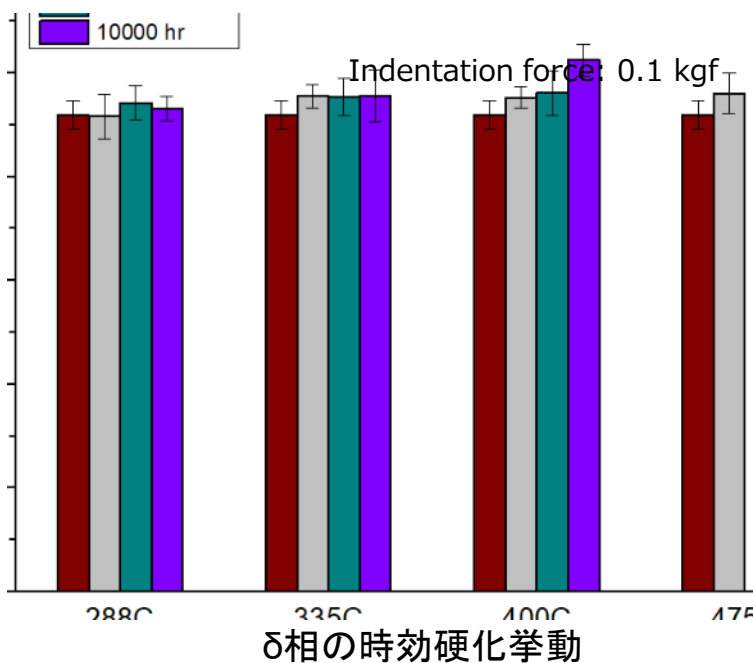
研究成果：(1) 溶融凝固過程を考慮した熱時効硬化・ミクロ組織変化挙動評価(東北大)

3種のδ相は、組織的特徴・分布形態・化学組成・境界における析出物の有無等の観点からそれぞれ特徴的であった。

	未時効・溶融境界				未時効・溶金				1340℃比較材			
TEM mag. 100K												
TEM mag. 25K												
特徴	相境界(母相側)にMoが主成分の析出物				高密度の転位析出物 無し				析出物・転位 無し			
フェライト相 平均組成 (wt. %)	Cr	Fe	Ni	Mo	Cr	Fe	Ni	Mo	Cr	Fe	Ni	Mo
	23.81	54.61	4.88	16.70	26.65	60.58	5.70	7.07	24.13	60.65	5.02	10.20
	24.73	56.21	4.28	14.78	26.78	60.47	5.48	7.27	23.47	60.24	5.35	10.94
	24.32	58.85	5.49	11.34	26.86	60.14	5.31	7.68	23.62	59.42	5.50	11.46

# 研究成果: (1) 溶融凝固過程を考慮した熱時効硬化・ミクロ組織変化挙動評価(東北大)

475 °CにおいてはG相前駆体と考えられるNi-Si-MoクラスターならびにMo濃化領域が形成されており、この結果は、後段のタスク(2)における計算結果「MnとMoを含む合金においては、G相の第2副格子を主として占有するのはMnではなくMoである。」と整合すると考えられた。





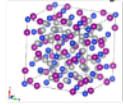
# 研究成果: (2) データサイエンスを駆使した汎化性能の高いマイクロ組織変化予測モデル構築 (NIMS、北科大)

## 物理モデル構築と教師データ生成 (Physical Modeling)

### A. 熱力学モデル構築

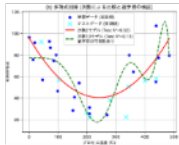
エンドメンバーの生成エネルギーの精緻化

- ・ 複雑組成化合物対応
- ・ DFT計算 (VASP)
- ・ N-K則



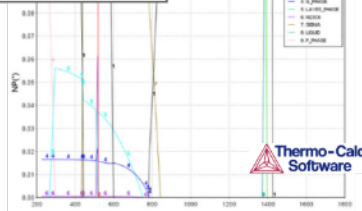
相互作用項に対するスプースモデリング

- ・ 実験データの精査
- ・ L2正則項の付与
- ・ 必要なパラメータの選択



★ロバスト性の確保  
広範囲な組成・温度条件でも破綻しないモデル構築

平衡状態図計算の精度向上



平衡状態の温度依存

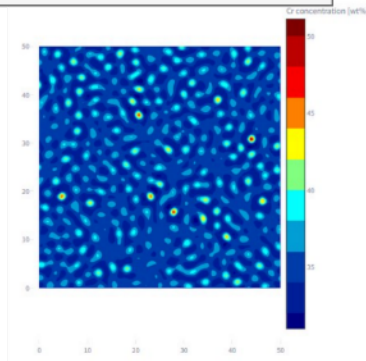
析出物の情報

### B. フェーズフィールド法

Fe-Cr二元系Phase Field法  
時間発展方程式 (Cahn-Hilliard)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot M \nabla \frac{\delta F}{\delta c}$$

[微細組織シミュレーション]  
spinodal分解の濃度分布を  
精密に計算

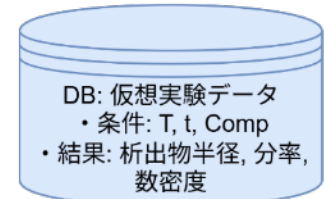


Fe-30Crのスピノードル分解挙動

母相組成の情報

### C. G相の析出・成長挙動予測のための教師データ生成

TC-PRISMA  
ハイスループット計算  
(Batch Processing)



ML学習用データ

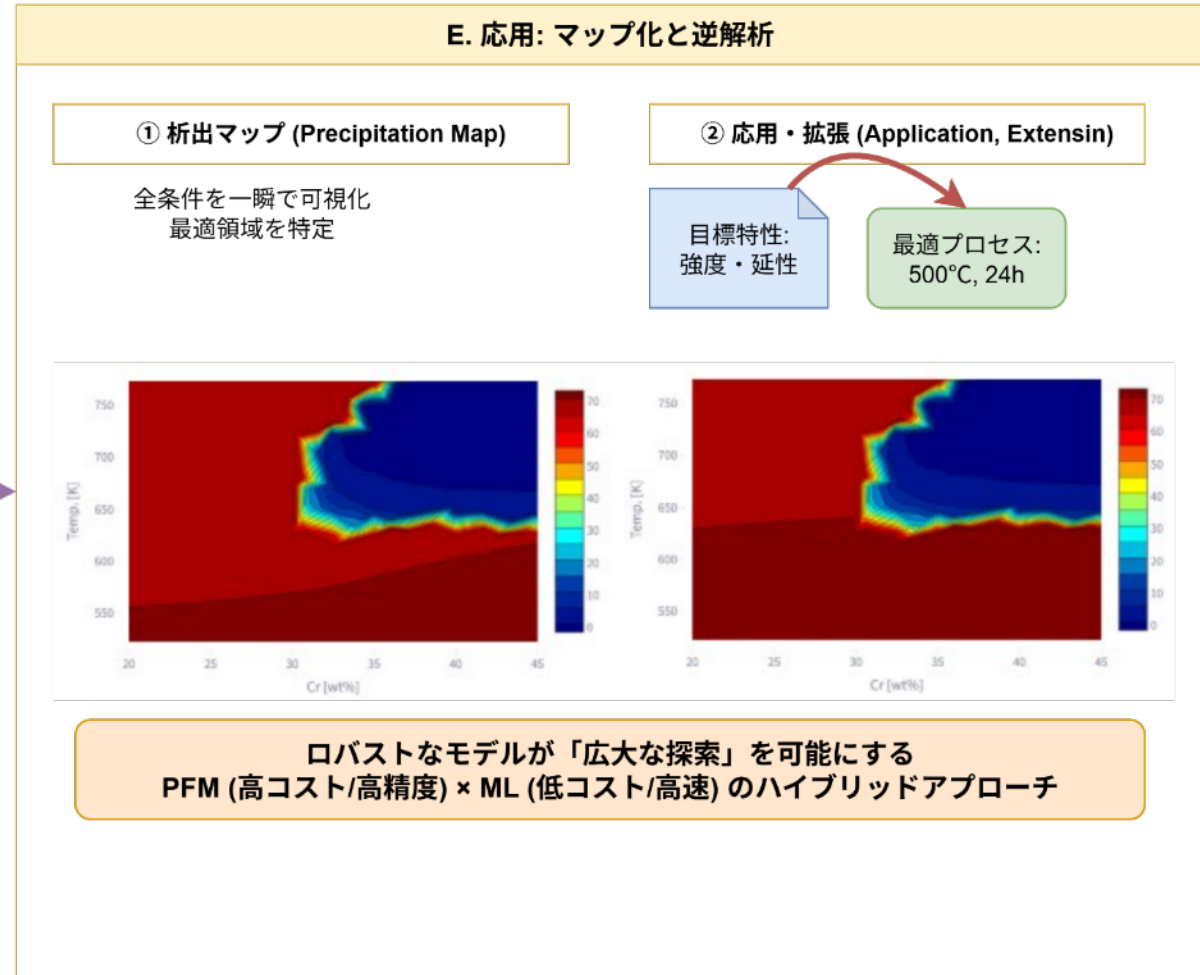
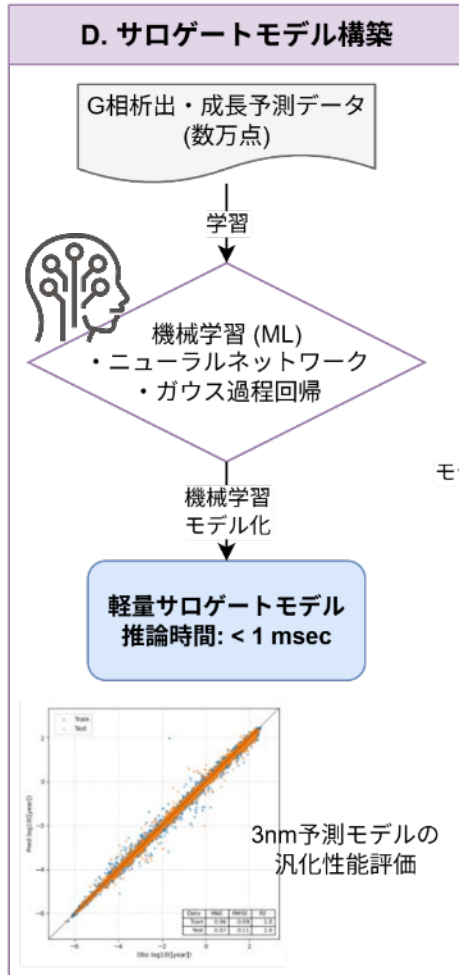
- ・ 機械学習予測モデルの構築のためのデータベース構築
- ・ 最適組成を得るための傾向把握

### 熱力学データの公開(GitHub)



# 研究成果: (2) データサイエンスを駆使した汎化性能の高いマイクロ組織変化予測モデル構築 (NIMS、北科大)

## 機械学習モデルと逆解析 (ML Acceleration & Inverse Design)



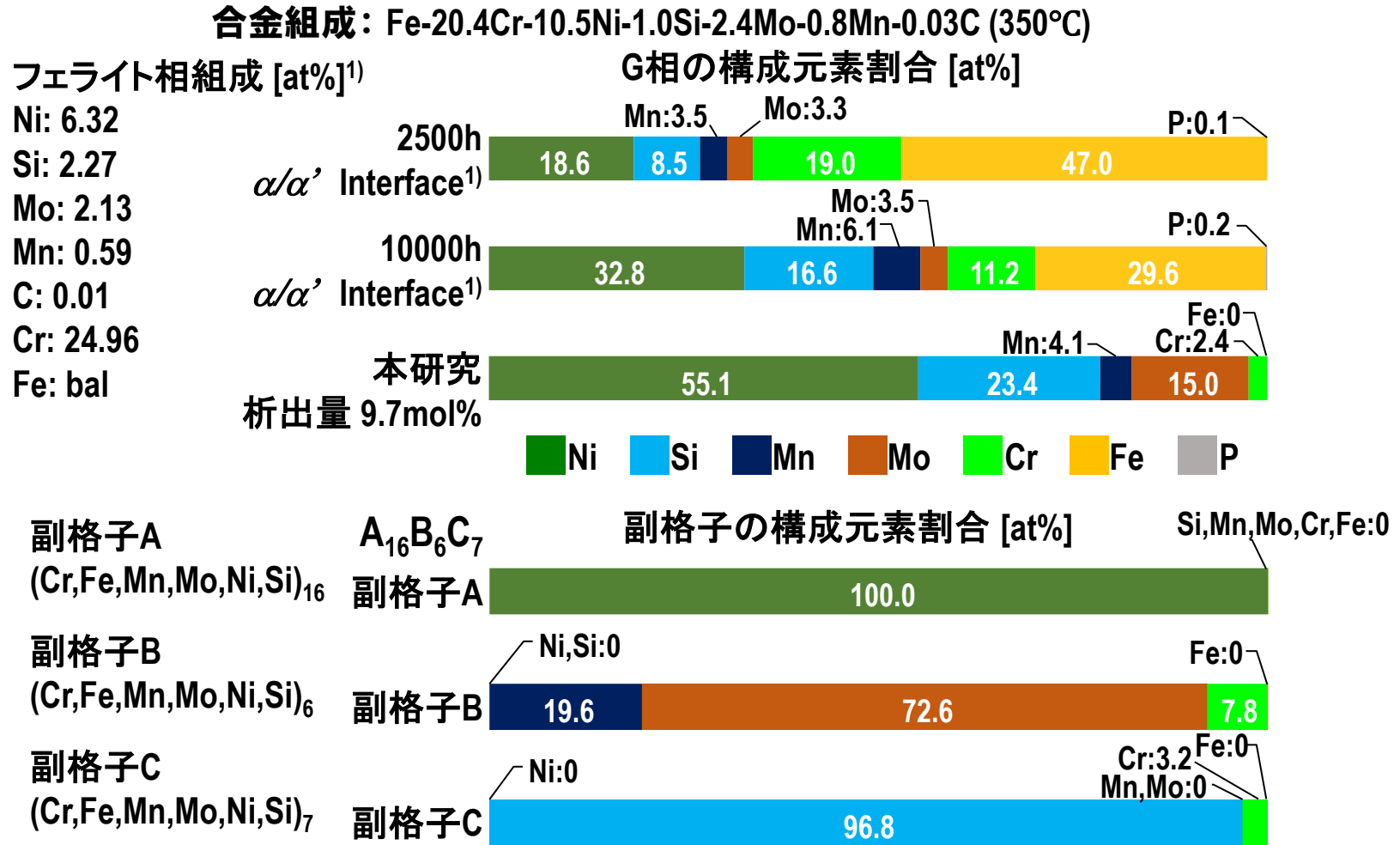
データサイエンスの活用で、従来の簡易的な評価よりも一歩進んだ解析の実施





## 研究成果: (2) データサイエンスを駆使した汎化性能の高いミクロ組織変化予測モデル構築 (NIMS、北科大)

本研究において構築したG相熱力学モデルによる平衡計算結果は、最適化に使用していない組成範囲においても新規実験データと良好な一致を示し、未知合金への高い汎化性能を実証した。

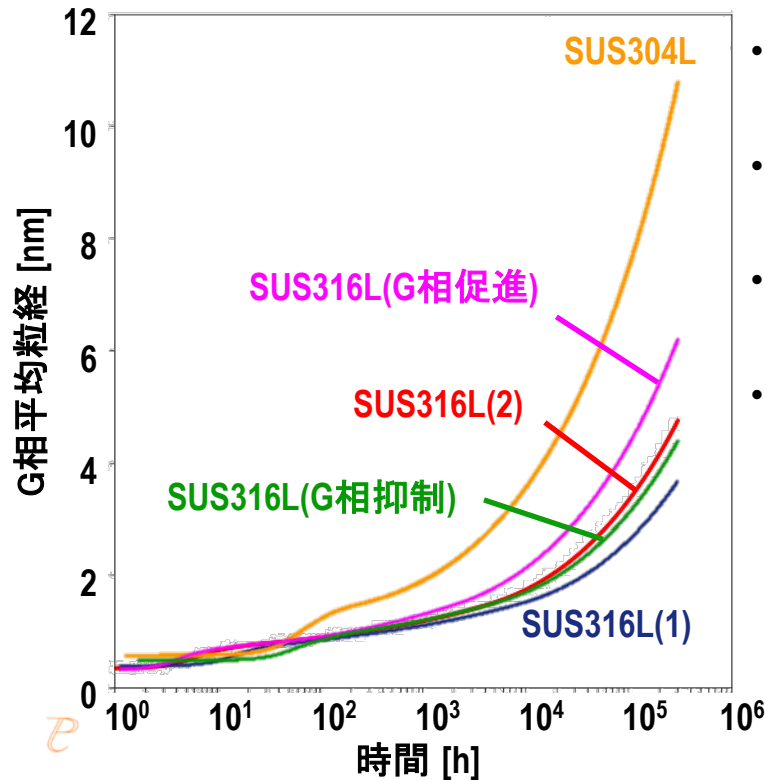
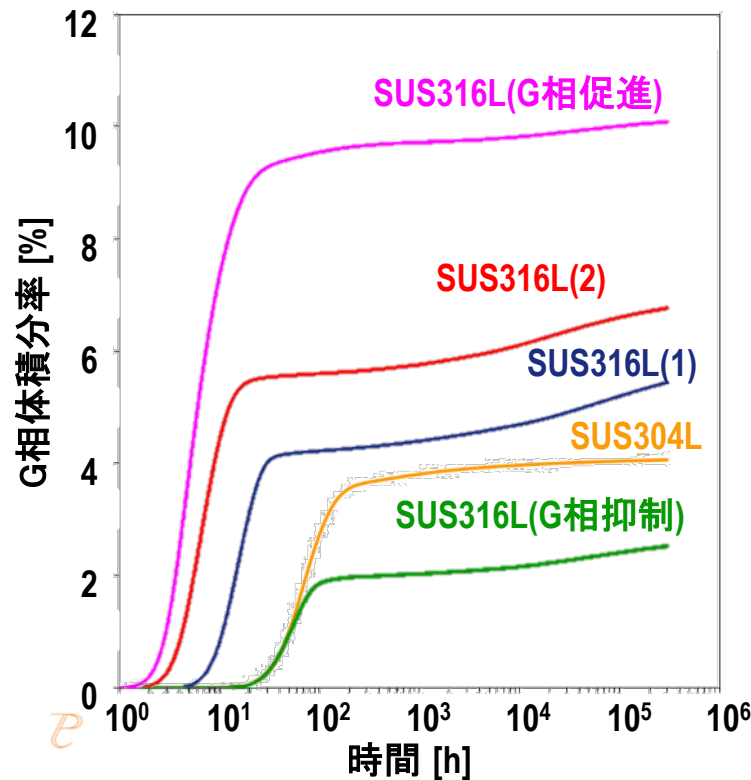


### 開発したG相熱力学モデルによる平衡計算例

## 研究成果: (2) データサイエンスを駆使した汎化性能の高いミクロ組織変化予測モデル構築(NIMS、北科大)

本研究において構築したG相熱力学モデルにより、任意の組成および温度条件下でG相の安定領域・溶解度積・析出駆動力を定量評価できる基盤を確立した。

フェライト相組成 wt%	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
SUS316L(1)	70.96	18.57	6.54	3.17	0.24	0.514
SUS316L(2)	71.68	17.59	7.35	2.38	0.30	0.686
SUS304L	73.75	19.31	5.71	-	0.74	0.495
SUS316L G相促進	66.75	20.05	8.75	2.38	0.87	1.197
SUS316L G相抑制	74.65	18.00	4.49	2.25	0.36	0.244



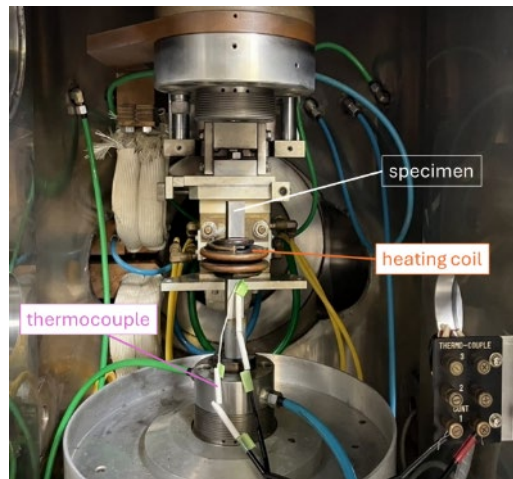
- SiおよびNi濃度はG相の安定性を高め、Crは相分離を促進する。
- 拡散係数および局所組成勾配が析出核生成速度を支配する。
- 温度上昇は析出時間に指数関数的影響を与える。
- 一定の仮説に基づくものの、照射下におけるG相析出予測についても今回のモデルで説明が可能である。

G相析出挙動に及ぼす合金組成の影響

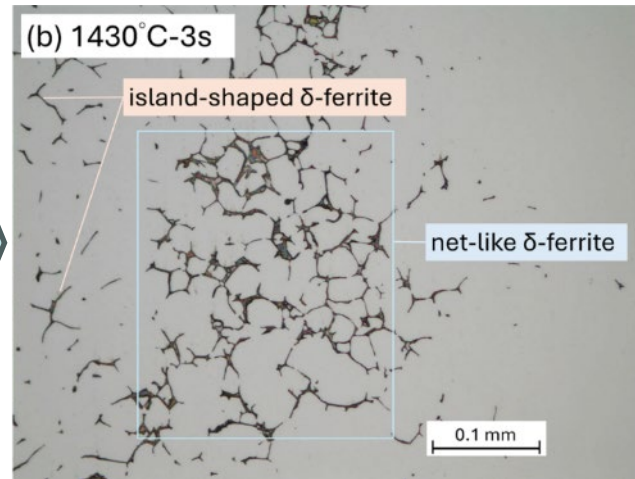
# 研究成果: (3) 応力腐食割れ進展抵抗性に優れた2相組織の創成(東北大)

Z. Fu, H. Abe, Y. Watanabe, *Journal of Nuclear Materials*, 2025. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2025.156

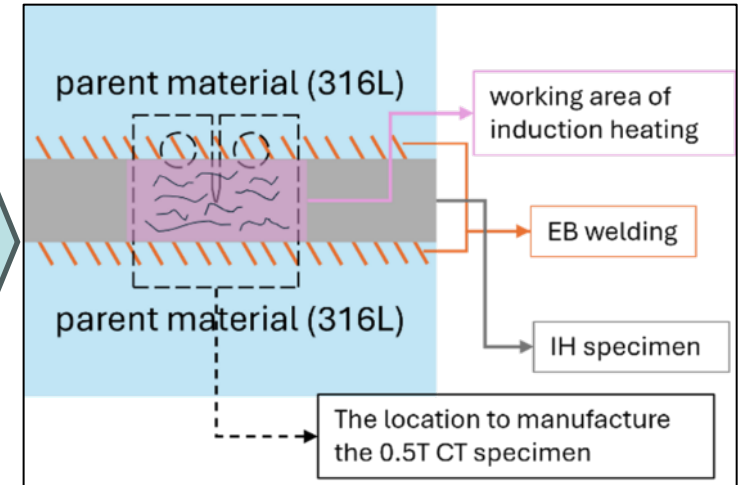
316L鋼試料に対して溶接熱模擬熱処理を実施することで、粒界に島状 $\delta$ 相が広く分布した組織を作製し、高温水中SCC試験によってフェライト相のSCC進展抵抗性を評価する。



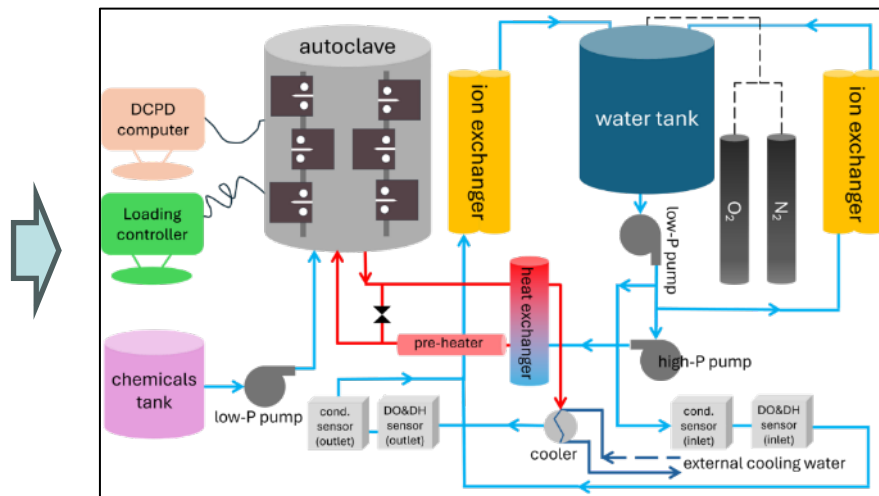
高周波誘導加熱処理



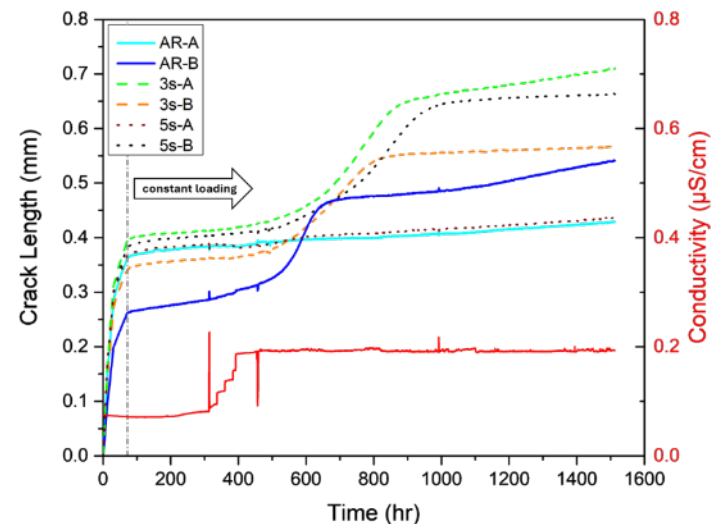
粒界島状 $\delta$ 相が分布した組織



CT試験片の作製



高温水中SCC進展試験装置セットアップ

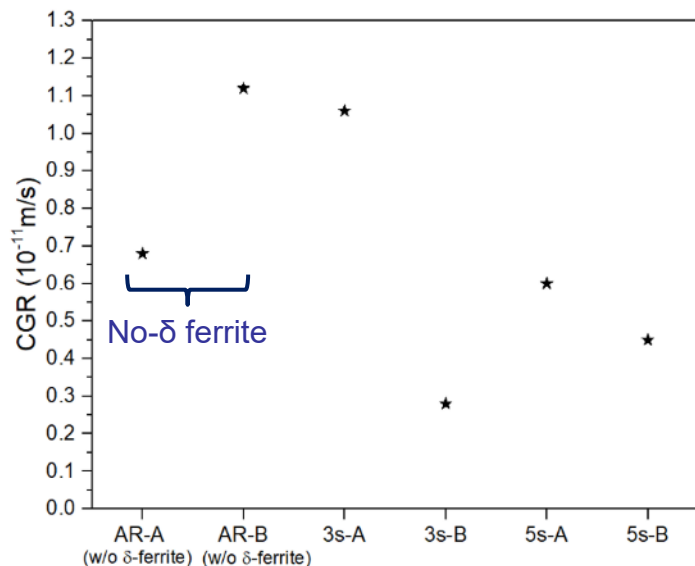


直流電位差法によるき裂進展モニタリング

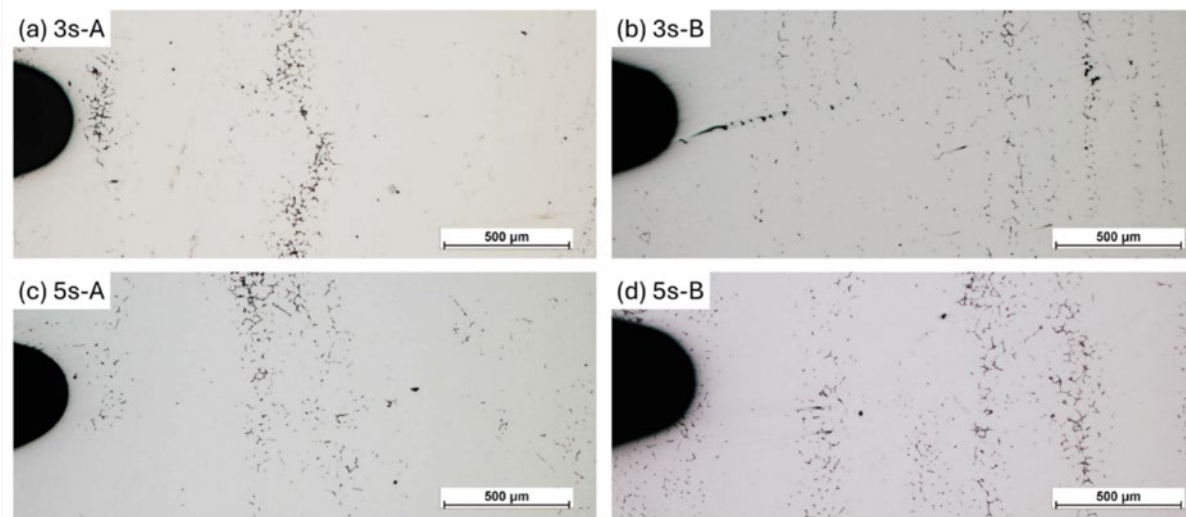
# 研究成果: (3) 応力腐食割れ進展抵抗性に優れた2相組織の創成(東北大)

Z. Fu, H. Abe, Y. Watanabe, *Journal of Nuclear Materials*, 2025. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2025.156

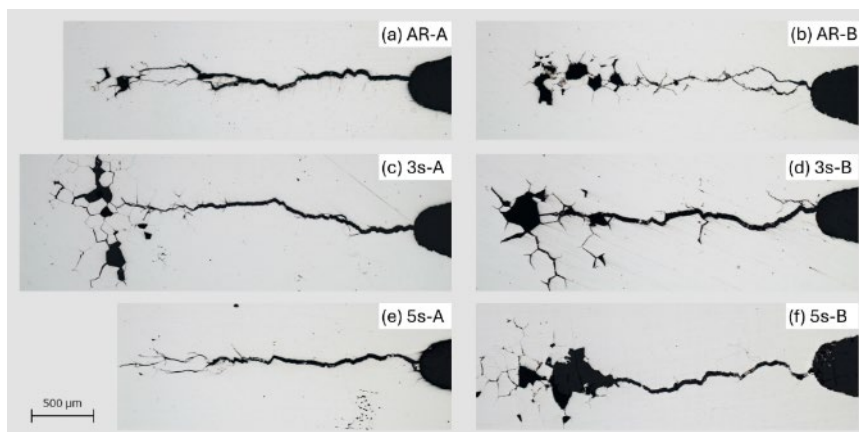
$\delta$ 相分布が限定的であったこと、き裂進展速度が極めて小さかったことから、き裂進展速度に及ぼす $\delta$ 相分布の影響については明確には認められなかった。一方で、2次き裂を対象とした観察・分析によって、 $\delta$ 相は一定のき裂進展遅延効果を有することが示された。



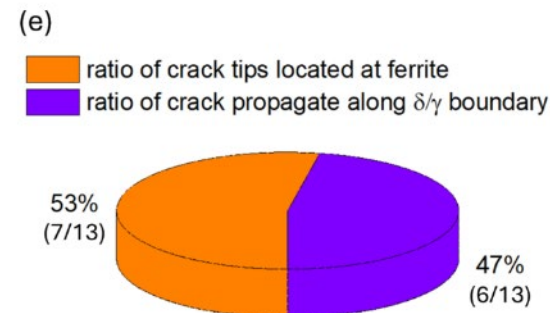
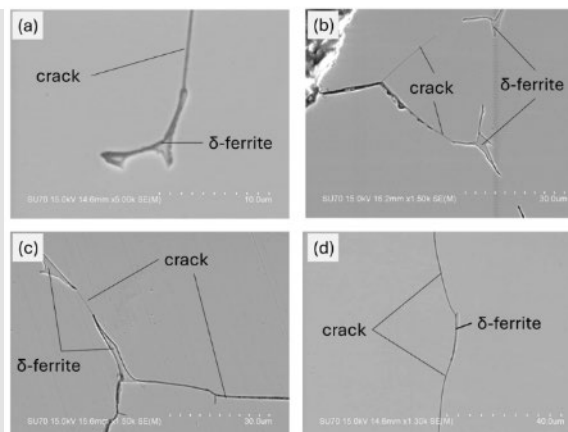
各試験片のSCC進展速度



き裂進展領域の $\delta$ 相分布形態



き裂進展試験後の試験片断面観察例



2次き裂を対象としたき裂先端と $\delta$ 相の位置関係の評価



# まとめ「経年変化耐性に優れた次世代ステンレス鋼溶接金属の設計指針提案」

熱時効硬化ならびに応力腐食割れ耐性に優れたステンレス鋼溶接金属の設計指針を提案した。熱時効硬化については、使用温度範囲に応じて最も熱時効劣化感受性の低いフェライト組成の設計指針を検討した。応力腐食割れに関しては、母材の粒界のみが優先的に溶融・凝固して島状 $\delta$ 相が分布した組織を広く再現可能な熱処理条件を提案するとともにこれを世界で初めて実証したこと、さらに粒界島状 $\delta$ 相が一定のSCCき裂進展抵抗を有することが示された。

- 最先端の計算科学手法を活用することで、G相析出の時間的・空間的挙動を定量的に予測できる統合モデルを構築するとともに、従来困難であった時空間的連成挙動の可視化を達成した。加えて、一定の仮説に基づくものの照射化の影響も考慮できたことなどを考えると、原子力材料の長期健全性評価および耐G相析出性材料設計に資する新しい計算基盤を確立したと考える。例えば、計算結果から示唆された「MnとMoを含む合金においては、G相の第2副格子を主として占有するのはMnではなくMoである。」との結果も、本課題で実施した実験によって裏付けられるなど、実験と計算の有機的な連携が達成された。
- 応力腐食割れに関しては、母材の粒界のみが優先的に溶融・凝固して島状 $\delta$ 相が分布した組織を広く再現可能な熱処理条件を提案するとともにこれを世界で初めて実証したこと、さらに粒界島状 $\delta$ 相が一定のSCCき裂進展抵抗を有することが示された。加えて、粒界に島状 $\delta$ 相が広く分布した組織を得るためには、母材の融点と粒界の融点の差が大きいこと、Cr当量／Ni当量比が高い（FA凝固モード領域）であることが望ましいとの知見が得られ、“SCC進展に対して免疫なステンレス鋼組織”の開発に繋がる具体的な見通しを得た。