

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化 基盤研究開発プロジェクト」

プロジェクトの詳細説明 (公開)

【高温クリープSG(委託)】

①-4) 溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計指針提示と
長時間クリープ強度予測法の開発

((財)金属系材料研究開発センター, (独)物質・材料研究機構, 室蘭工業大学, 東北大学,
東京工業大学, 名古屋大学, 京都大学, 九州大学, 九州工業大学)

平成21年7月3日(金)

p.1/27

1. 背景
2. 研究開発の実施体制
3. 開発目標と達成状況
4. 検討内容
5. まとめと最終目標に向けた
今後の取組み

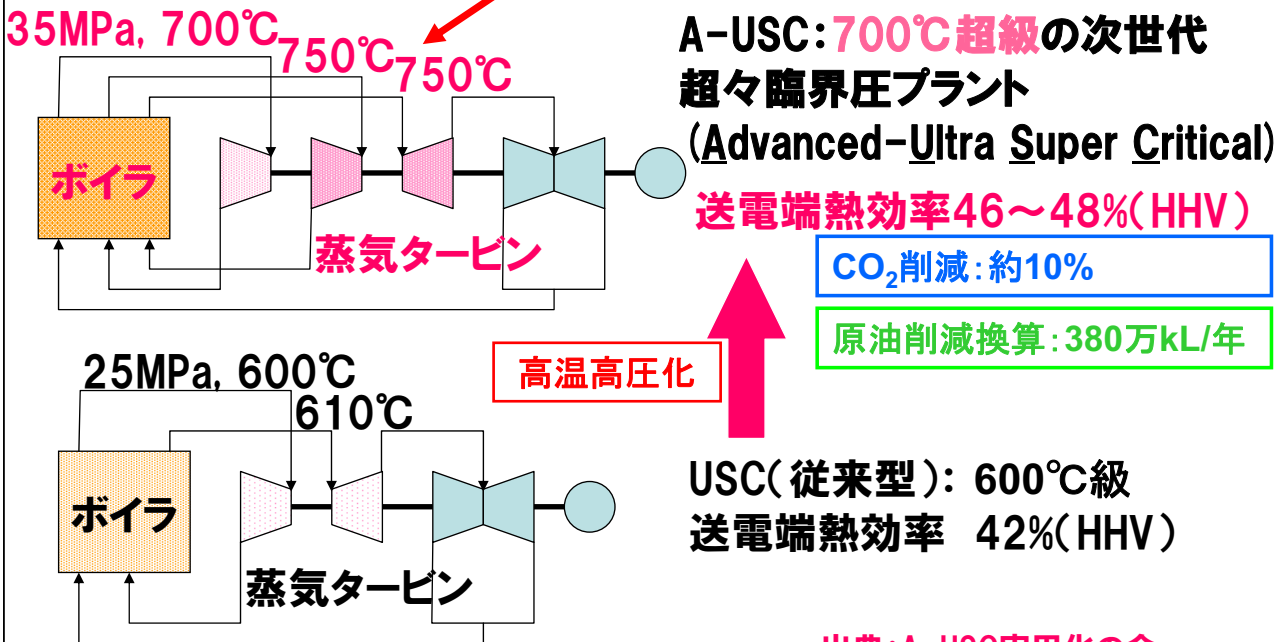
p.2/27

1. 背景

公開

石炭火力の高効率化はわが国喫緊の課題

高温部に多量のNi基合金を使用 ⇨ 経済性の問題



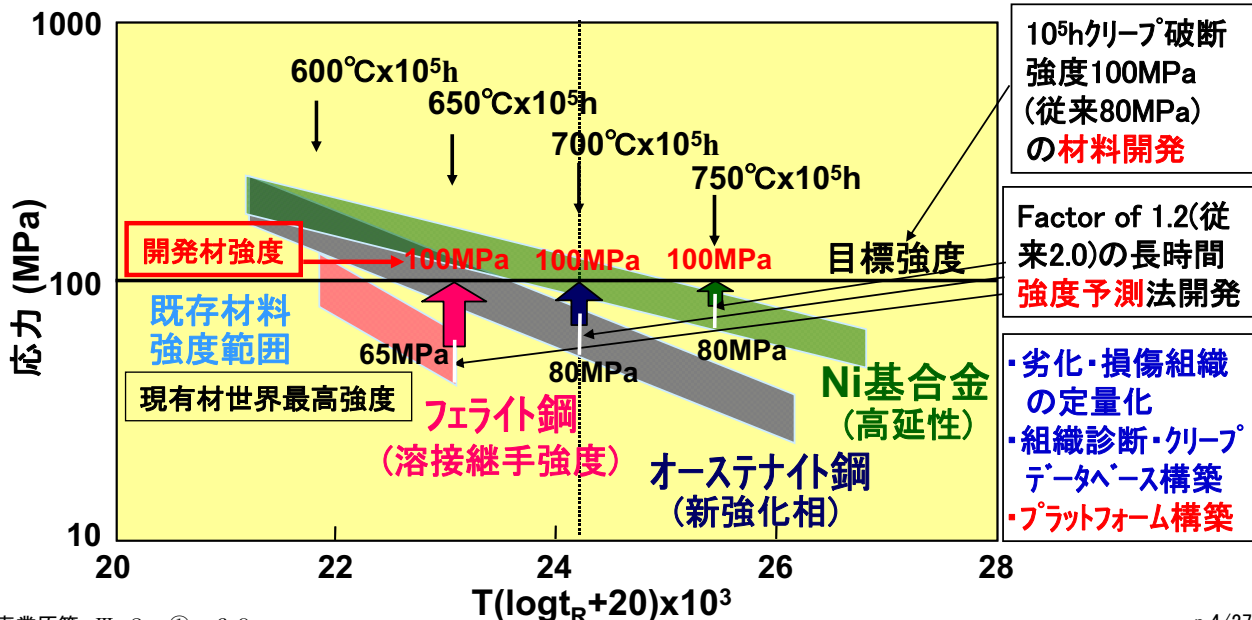
出典: A-USC実用化の会

1. 背景

公開

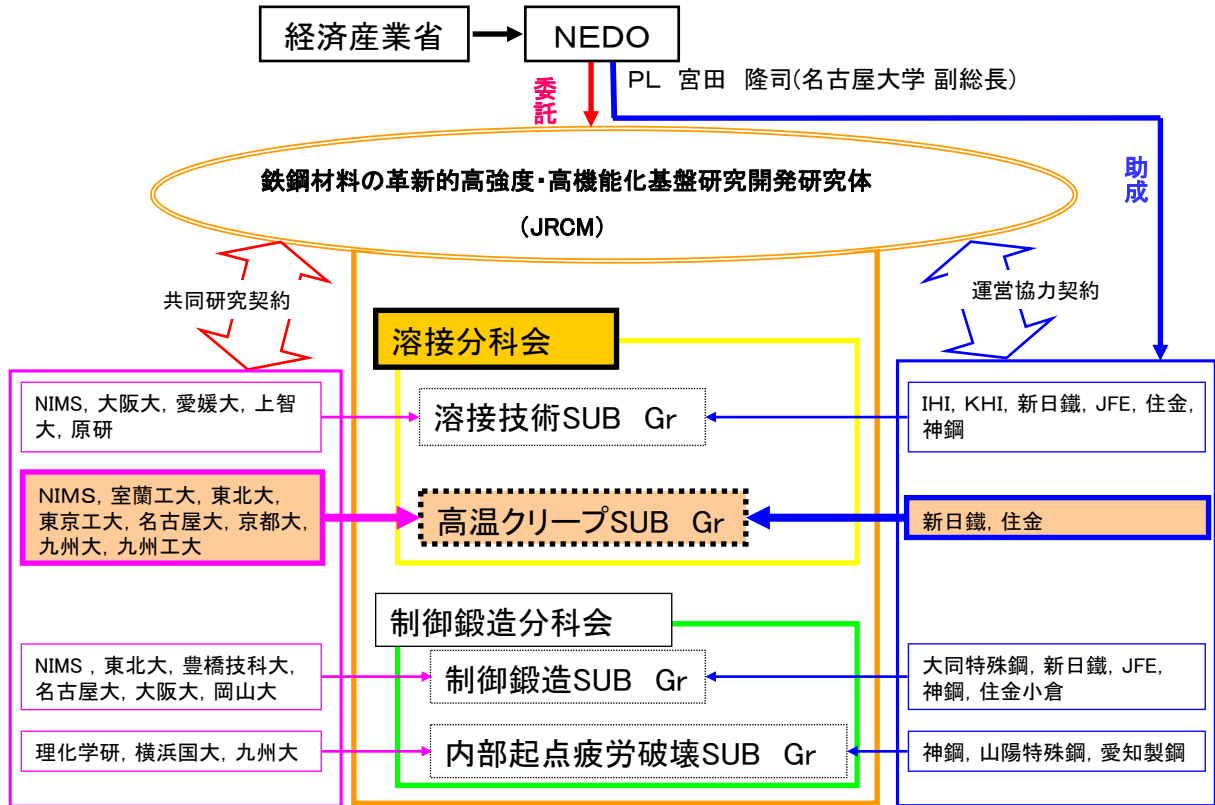
高温高圧化を実現するためには

- 新高強度耐熱鋼の開発
- 高精度長時間強度予測技術の開発が必須



2. 研究開発の実施体制

公開



3. 開発目標と達成状況

公開

研究開発項目 ①-4 「溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計指針提示と長時間クリープ強度予測法の研究」

中間目標	最終目標	成果	達成状況	最終目標に向けた今後の取組み
<ul style="list-style-type: none"> 溶接継手クリープ強度係数0.7以上、3万hクリープ強度100MPaの700°C級耐熱材料の合金設計指針の提示 溶接継手のクリープ特性と組織劣化パラメータをリンクできるプラットフォームの構築 	<ul style="list-style-type: none"> 溶接継手クリープ強度係数0.7以上、10万hクリープ強度100MPaの700°C級プラント用耐熱材料の合金設計指針の提示 破断時間推定精度 Factor of 1.2の高精度クリープ強度推定法の提案 	<p>中間目標を達成目処</p> <ul style="list-style-type: none"> 溶接継手クリープ強度係数0.7以上、3万hクリープ強度100MPaの700°C級耐熱材料の合金設計指針を世界で始めて明確化した。 <ul style="list-style-type: none"> (1) 650°C用フェライト系耐熱鋼、高B低N鋼を提案 (2) 700°C用オーステナイト系鋼、金属間化合物粒界析出強化鋼を提案 (18Cr-30Ni-3Nb鋼) 溶接継手のクリープ特性と組織劣化パラメータをリンクできるプラットフォームプロトタイプを提案した。 <ul style="list-style-type: none"> (1) 組織パラメータによる新劣化診断法の確立 (組織自由エネルギー法、粒界方位差測定法、高精度陽電子寿命測定法、極小SPクリープ試験法) (2) クリープ強度新解析法の提案とデータベースの収集・蓄積 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ ○ 	<ul style="list-style-type: none"> 得られた指導原理の高度化および最適組織実現による10万h、100MPa強度の達成 データベースの拡充・高度化による組織診断プラットフォームの完成と強度推定精度 Factor of 1.2の実証

論文発表: 20件投稿済み

<達成状況>

年度末における研究成果が

◎	中間目標を超過達成していると予想される。
○	中間目標達成可能と予想される。
△	中間目標未達となることが懸念されるが、来年度早期での挽回が可能。
×	中間目標未達となることが懸念され、来年度早期での挽回も困難。

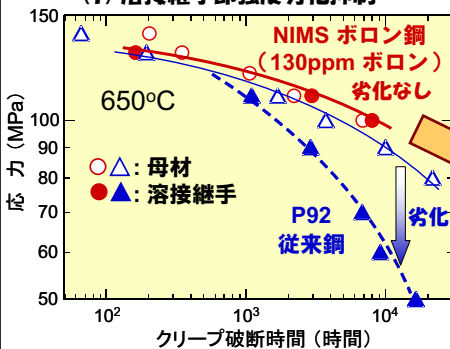
(1) 高強度鋼の合金設計指針提示

10万時間、100MPaを有する材料開発(従来鋼:上限80MPa)
(中間目標: 3万時間、100MPa)

- 650°C用フェライト系耐熱鋼
(溶接継手強度係数 > 0.7)
- 700°C用オーステナイト系耐熱鋼

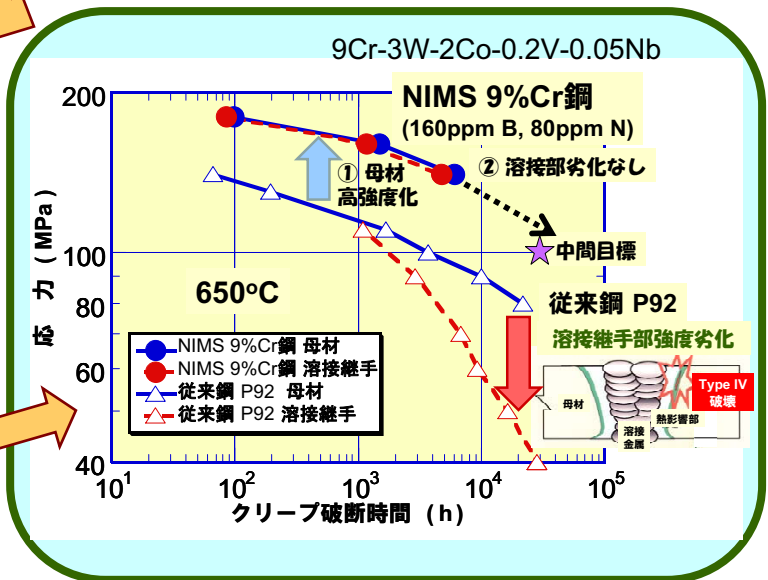
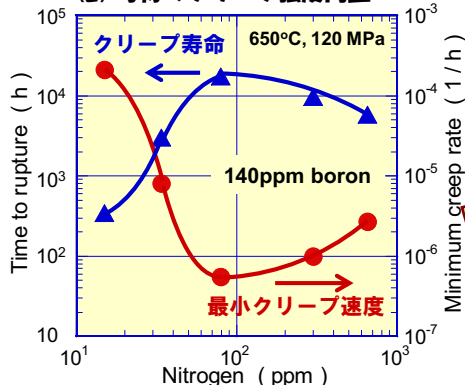
フェライト鋼の組織劣化と長時間強度低下機構の解明

(1) 溶接継手部強度劣化抑制



高B固溶-MX制御で母材を高強度化。
B/N最適化で溶接継手強度を向上。
中間目標達成目処 (1) 650°C, 3万h, 100MPa
(2) 溶接継手強度係数 > 0.7

(2) 母材のクリープ強度向上

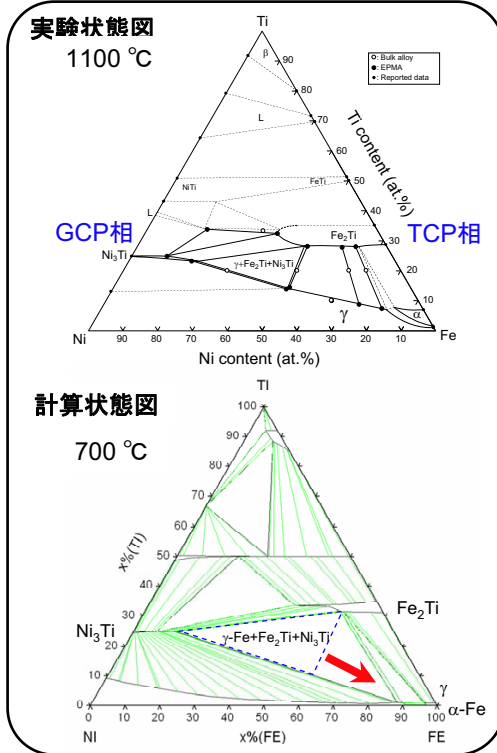


4. 検討内容

公開

オーステナイト系耐熱鋼の析出制御と設計指針の提示

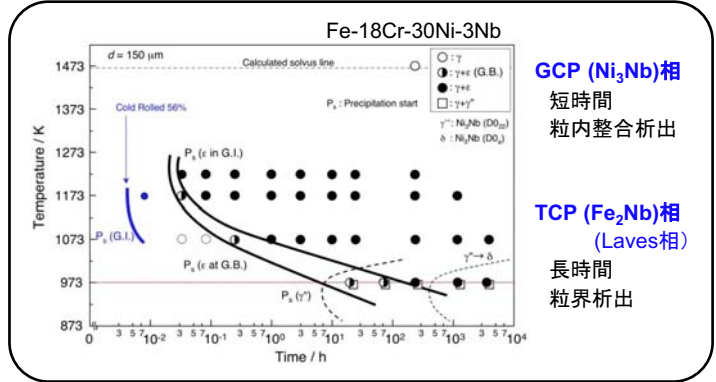
700℃での相平衡予測(平衡論)



オーステナイトは700℃において二種類の金属間化合物相と平衡
TCP相とGCP相

モデル鋼の提案
Fe-18Cr-30Ni-3Nb鋼 (wt%)

モデル鋼の析出相と析出形態(速度論)

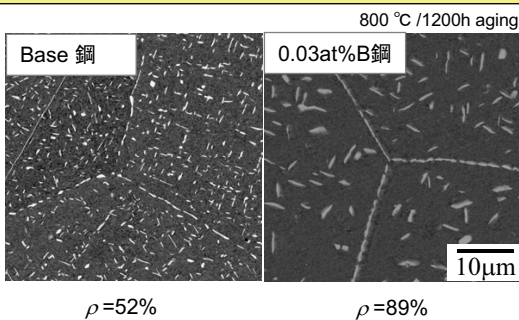


4. 検討内容

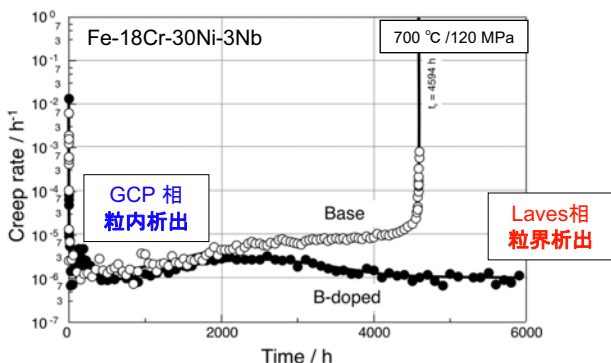
公開

オーステナイト系耐熱鋼の析出制御と設計指針の提示

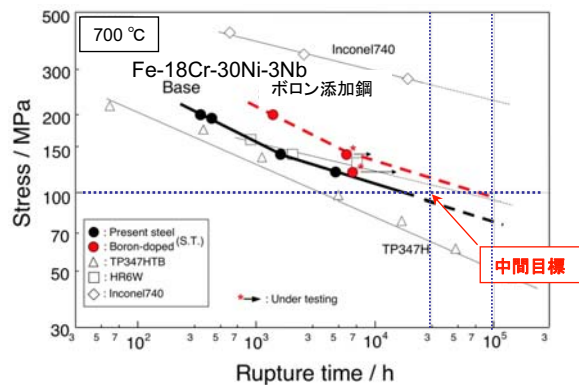
ボロンの添加により粒界被覆率増大



Laves相の粒界被覆でクリープ抵抗増大



既存合金とのクリープ破断強度の比較



**B添加成分系にて中間目標の達成目処
100 MPa @700℃ x 3万時間**

今後の方針

粒界析出強化の最大限利用する組織制御の手法を確立し、最終目標(100 MPa、@700℃ x 10万時間)を達成する世界最高強度の材料を得る設計指導原理を構築する

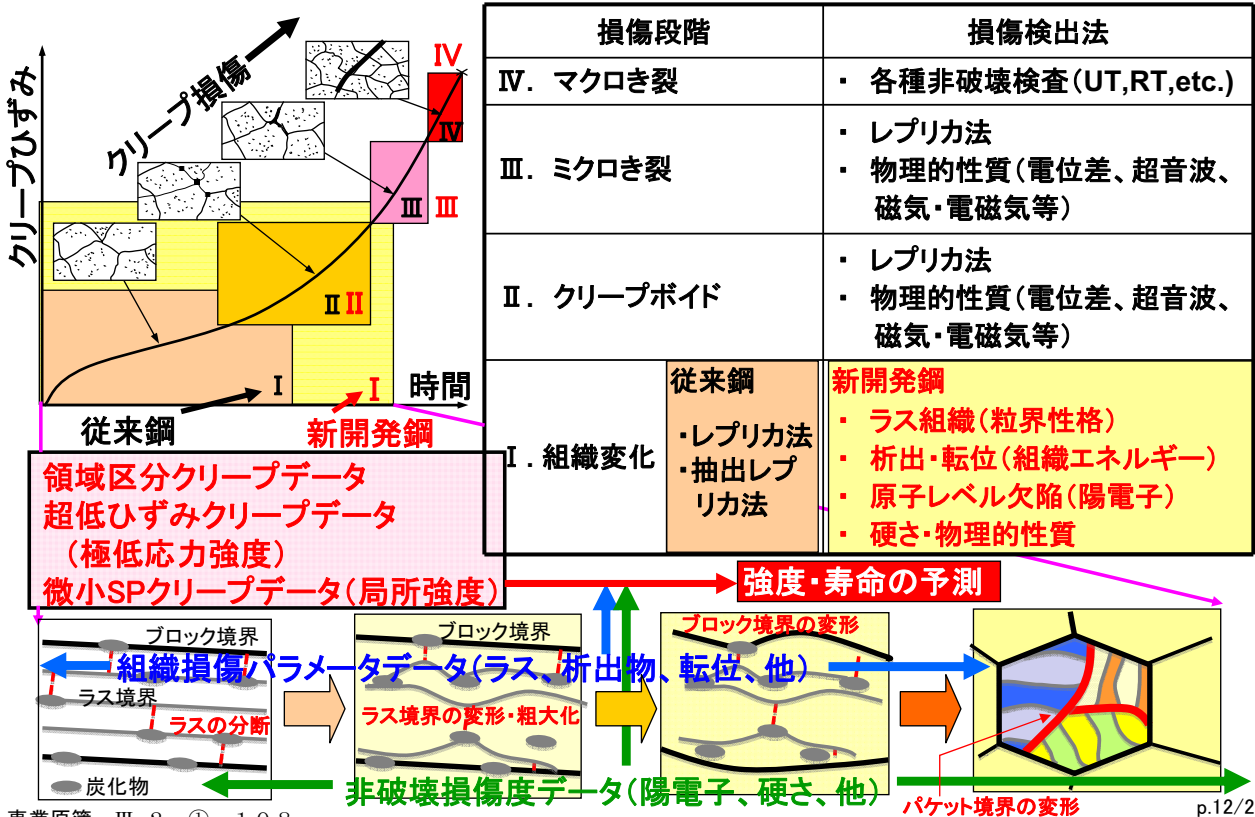
(2) 長時間強度予測技術の開発

- (2) - 1 組織パラメータによるクリープ劣化度の測定、組合わせ適用による高精度化
- (2) - 2 クリープデータ新解析法の提案、実プラント環境下の強度予測法の開発



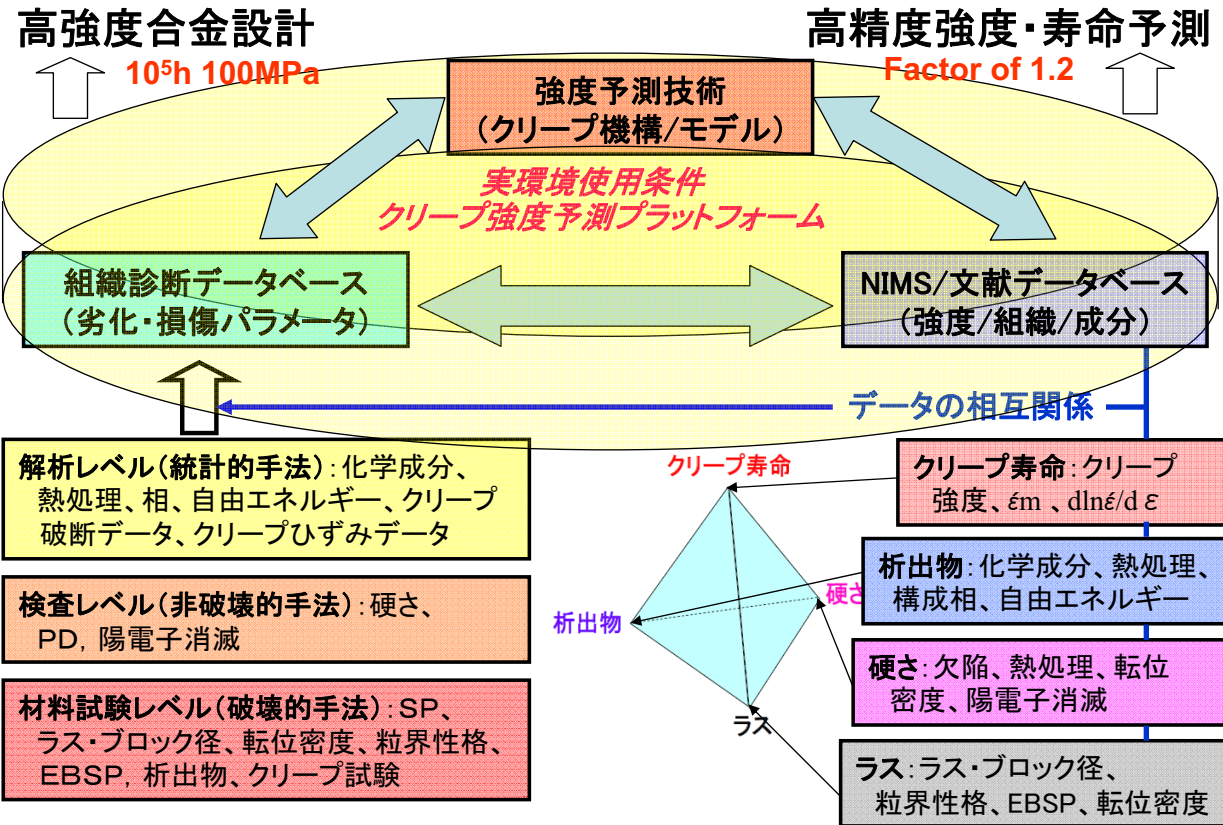
- ・ プラットフォームデータベースの構築
- ・ クリープ特性と組織劣化パラメータをリンクできるプラットフォームの構築

プラットフォームデータベースの構築(組織パラメータの相互関係)



4. 検討内容

公開



4. 検討内容

公開

(2) 長時間強度予測技術の開発-1/2

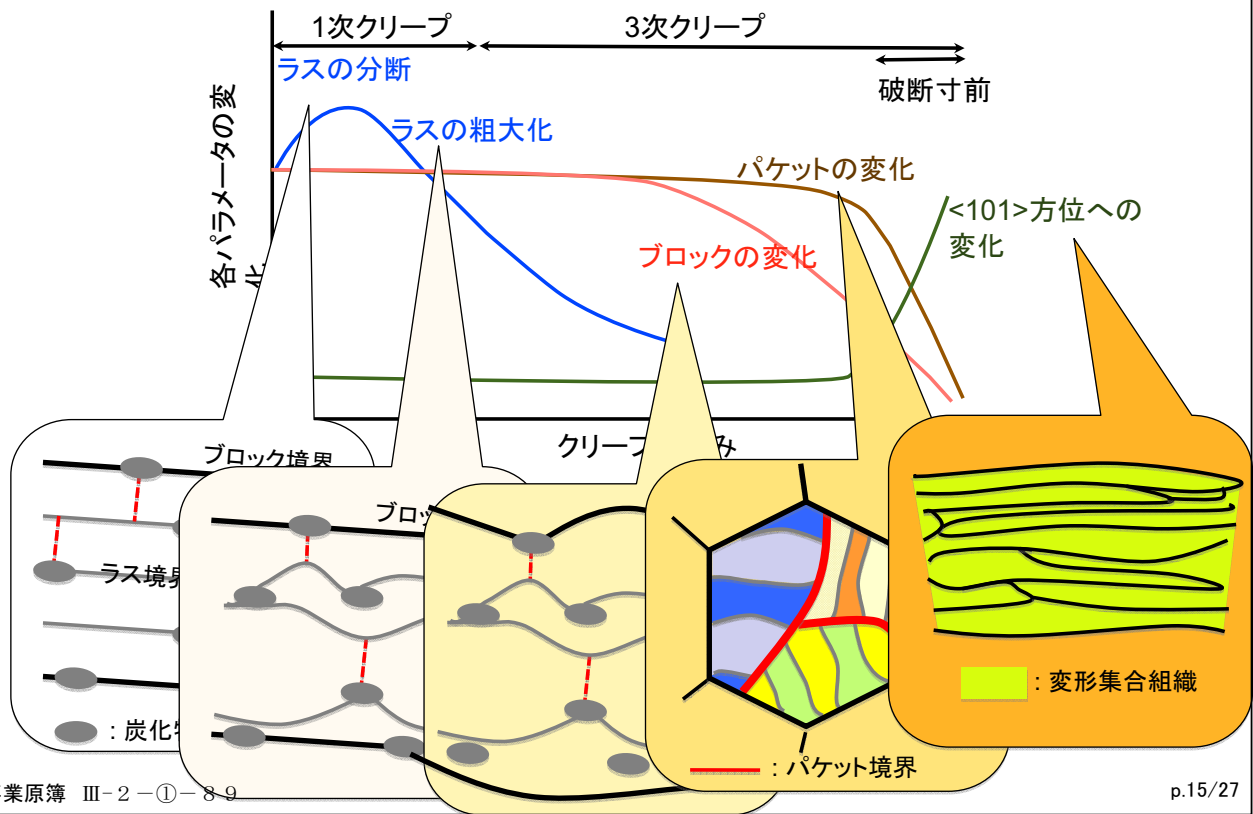
組織パラメータによるクリープ劣化度の測定、組合わせ適用による高精度化

- ・ 粒界方位差測定法
- ・ 組織自由エネルギー法
- ・ 高精度陽電子消滅寿命測定法
- ・ 極小スモールパンチクリープ試験法

4. 検討内容

公開

局所方位解析と新組織診断技術データベースの構築



4. 検討内容

公開

局所方位解析と新組織診断技術データベースの構築

クリープ全領域において、局所方位解析による組織劣化診断技術を確立

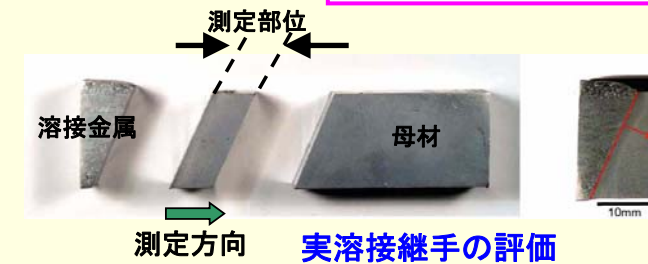
領域	1次クリープ～ 3次クリープ前半	3次クリープ後半	破断寸前
診断パラメータ	微小方位差(1~2°)	大角粒界における方位差	結晶方位変化
組織劣化の要因	ラス境界の変化	ブロック境界の変化	塑性変形による集合組織形成
評価例			

EBSDを活用した局所方位測定法の高精度化・高度化を推進、
クリープ条件や鋼種を変化させて、診断技術のデータベース化を図る。

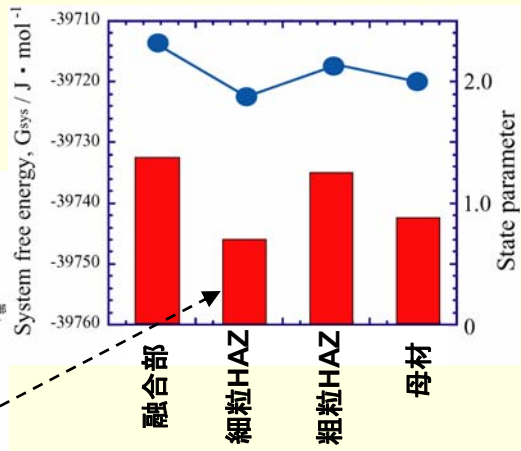
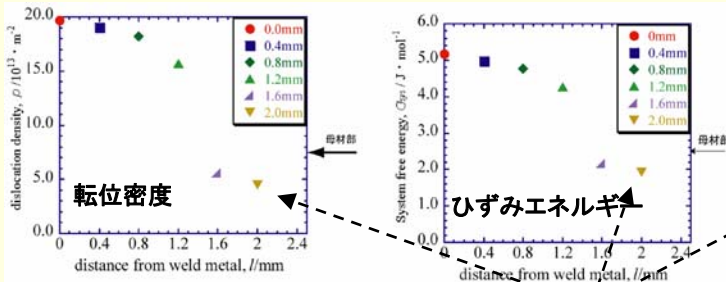
4. 検討内容

公開

溶接熱影響部(HAZ)の組織自由エネルギー評価



熱サイクルシミュレーション組織の評価



細粒HAZは最も回復した状態

化学的自由エネルギー 界面自由エネルギー ひずみ自由エネルギー

組織状態の指標 P

$$P = \left(1 - \frac{\Delta G_{chem}(measure)}{\Delta G_{chem}(total)} \right) + \left(1 - \frac{\Delta E_{str}(measure)}{\Delta E_{str}(total)} \right) + \left(1 - \frac{\Delta E_{surf}(measure)}{\Delta E_{surf}(total)} \right)$$

組織劣化とともに P は低下

4. 検討内容

公開

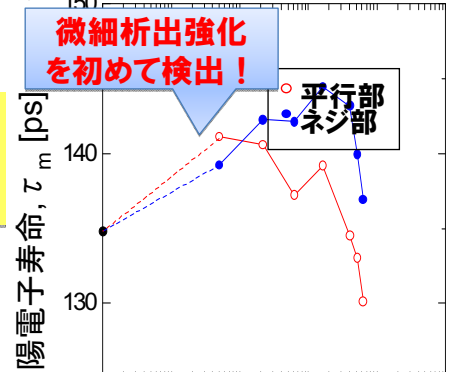
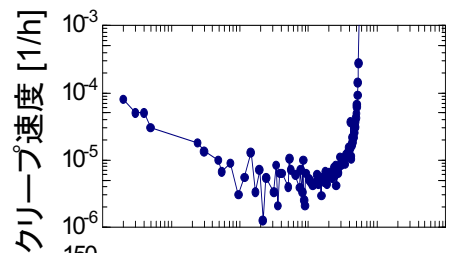
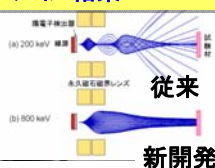
陽電子消滅寿命計測手法の高精度化・高度化

クリープ損傷高温その場計測装置
を世界で初めて開発

格子欠陥に極めて敏感な陽電子をクリープ試験中の耐熱合金に照射し、高温その場・非破壊・非接触で内部のナノ組織変化の連続測定を可能にした。



新開発電磁レンズが作る磁界中を運動する陽電子のシミュレーション結果



陽電子線クリープ試験機

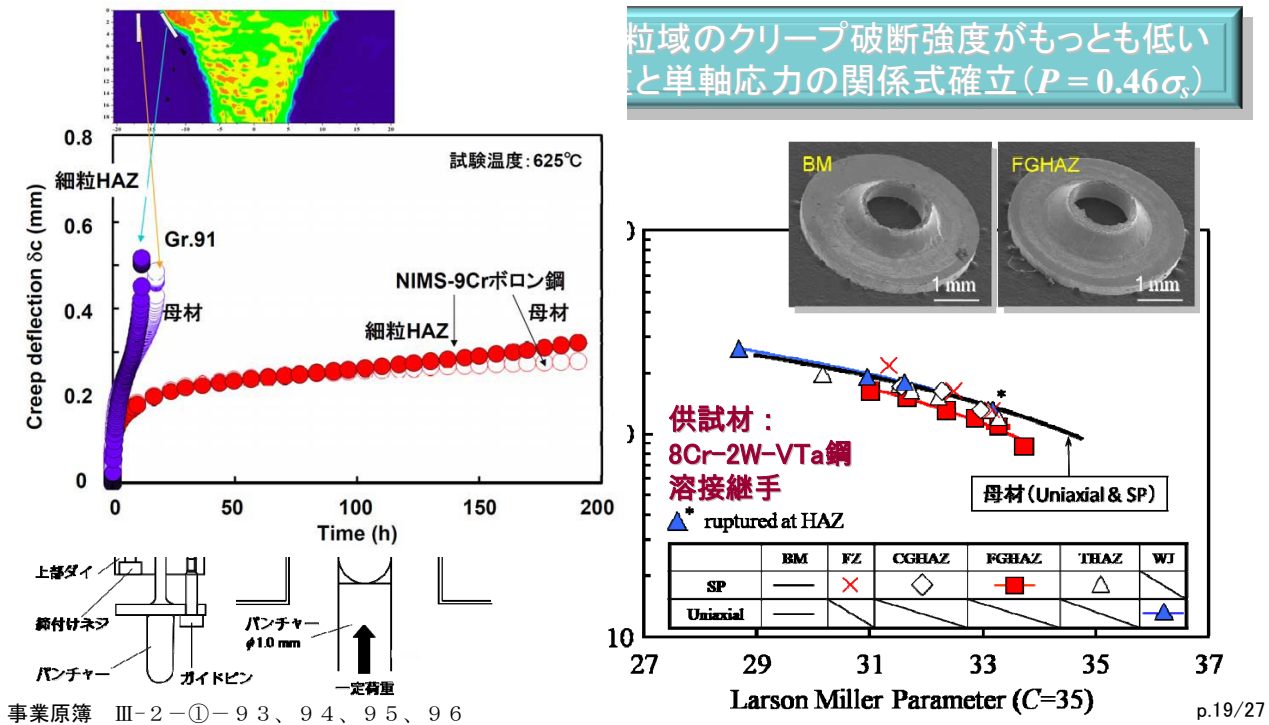
耐熱鋼のクリープ初期の微細MX析出強化を初めて捉えた

→ 新耐熱材料設計、予寿命予測に活用

4. 検討内容

公開

成果: 世界最小SPクリープ試験技術の開発とデータ取得 試験片寸法: $\phi 3 \times 0.25t$ mm (TEMディスクサイズ)



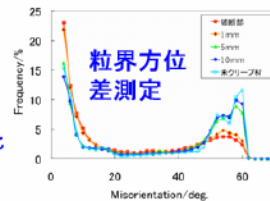
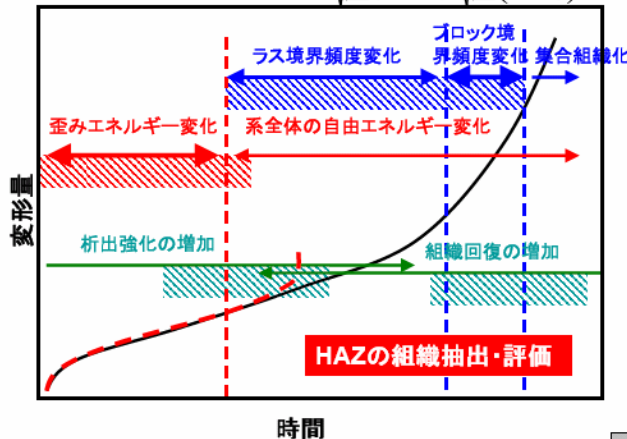
4. 検討内容

公開

組織診断プラットフォーム構築に基づくFactor of 1.2の高精度クリープ強度予測法の開発

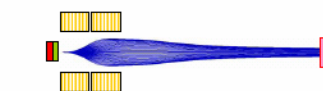
組織パラメータ因子を用いた強度予測技術確立

$$r = \frac{\sum(x_k - m_x)(y_k - m_y)}{\sqrt{\sum(x_k - m_x)^2} \sqrt{\sum(y_k - m_y)^2}}$$



$$G_{SYSTEM} = G_0 + E_{str} + E_{surf}$$

組織自由エネルギー法



陽電子消滅寿命法



スモールパンチクリープ試験

適時、精度の高い方法を組み合わせて強度予測技術確立。
さらに、 γ 系耐熱鋼、Ni基合金にも適用展開中。

クリープ試験条件
温度: 823~923 K
荷重: 50~90 N
雰囲気: Arガス

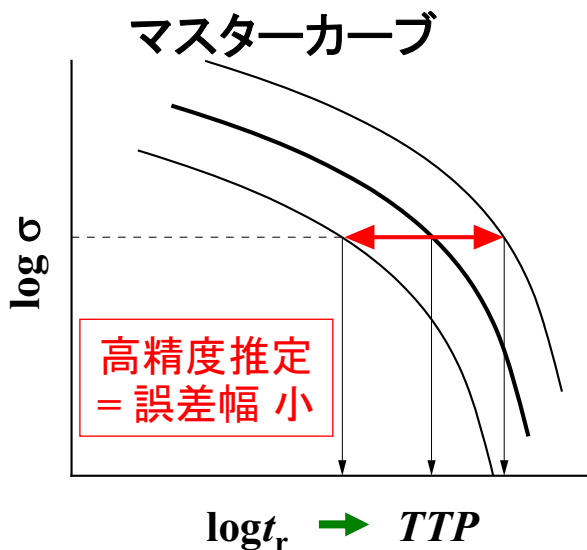
(2) 長時間強度予測技術の開発-2/2

クリープデータ新解析法の提案、実プラント環境下の強度予測法の開発

- ・ 領域区分法によるクリープ破断曲線の新解析技術
- ・ クリープデータベース・プラットフォーム構築による実プラント環境下における強度予測技術の確立

長時間強度推定法

TTPの不完全さの克服



TTPの不完全さ = Q値の変化

$$OSDP = t_r \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

従来法: Q(活性化エネルギー)は不変と仮定 ⇒ 1.2x1.3x1.3=2

領域区分解析の適用(Qの違う領域毎に解析) ⇒ 1.2x1.3x1.0=1.5

ヒート間差の原因説明 or 特定ヒートに限定 ⇒ 1.2x1.0x1.0=1.2

誤差幅(x2)に寄与する因子

- ・ ヒート内のばらつき x1.2
- ・ ヒート間差 x1.3
- ・ TTPの不完全さ x1.3

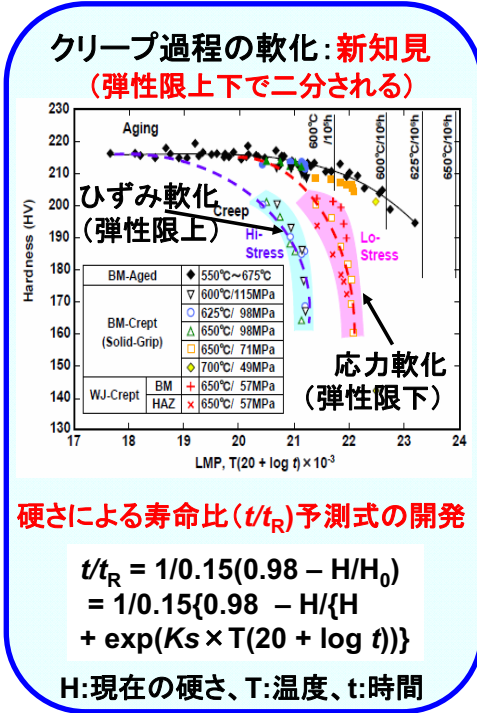
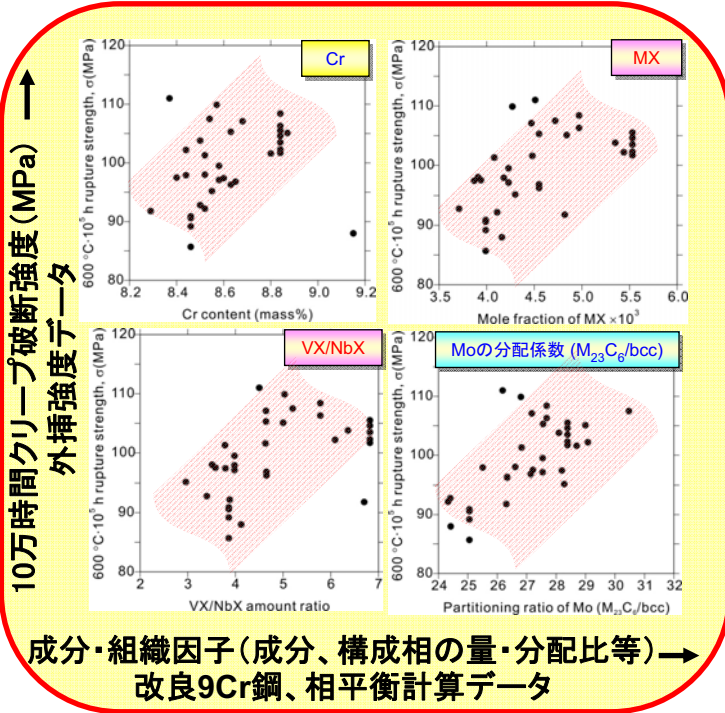
→ TTPの不完全さとヒート間差を除いて、精度x1.2を達成

4. 検討内容

公開

強度機能安定性に及ぼす最適組成・ナノ組織を解明
(実使用条件で安定な材料仕様最適化に実用可能)

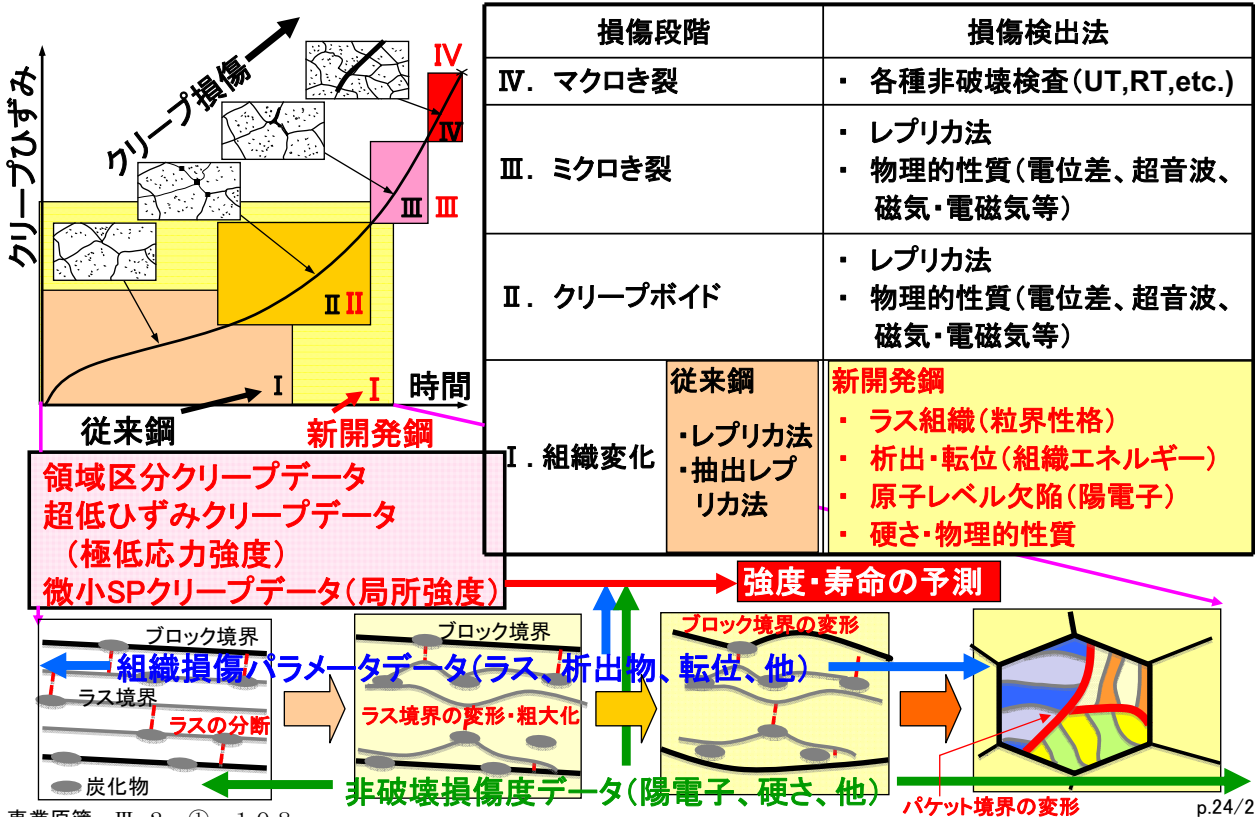
クリープ中の簡便な強度・寿命
予測法を開発



4. 検討内容

公開

プラットフォームデータベースの相互関係



● **中間目標の3万時間、100MPaを達成する材料を開発、溶接継手強度係数 >0.7 を確認**

1. 650℃用フェライト系耐熱鋼: 高B低N鋼を提案、粒界強化モデルを提案
2. 700℃用オーステナイト系鋼: 金属間化合物粒界析出強化鋼を提案 (18Cr-30Ni-3Nb鋼)

● **クリープ特性と組織劣化パラメータをリンクできるプラットフォームプロトタイプ提案**

1. 組織劣化パラメータによる新劣化診断法を確立 (組織自由エネルギー法、粒界方位差測定法、高精度陽電子寿命測定法、最小SPクリープ試験法)
2. クリープ強度新解析法の提案とデータベースの収集・蓄積

● **最終目標に向けた今後の取組み:**

1. 10万時間、100MPaの強度達成:
 - ・これまでに開発した9Cr鋼(B, N制御)の長時間クリープ試験とクリープ中の組織解析による組織安定化指針の確立(650℃用フェライト系鋼)
 - ・長時間クリープ試験の継続実施による10万時間強度の推定と組織解析結果に基づく組織制御を駆使して粒内・粒界強度バランスを最適化(700℃用オーステナイト系鋼)
2. 組織診断プラットフォームの完成:
 - ・対象材料・対象条件の拡大・蓄積によるデータベースの拡充
 - ・組織と強度のリンクのための高性能ソフト開発と試行
 - ・パラメータの相互関係を明瞭にする検量線ダイヤグラムの開発・作成(共通試料のデータによる各種方法の最適組み合わせ法の開発)
 - ・データベースを用いたFactor of 1.2の実証解析

高温クリープサブテーマの構成－委託・助成研究の相関・役割分担－

