

## 2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

エネルギーイノベーションプログラム  
ナノテク・部材イノベーションプログラム

# 「鉄鋼材料の革新的高強度 ・高機能化基盤研究開発」

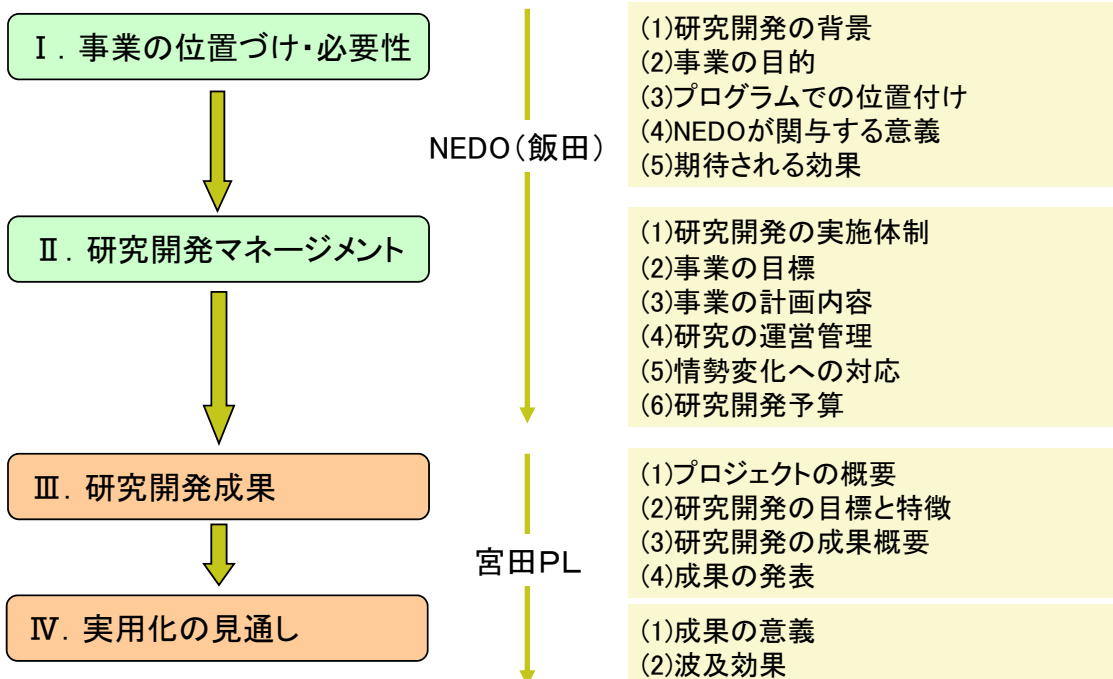
(2007年度～2011年度 5年間)

プロジェクトの概要 (公開)

NEDO技術開発機構  
ナノテクノロジー・材料技術開発部

2009年 7月 3日

## 内容



# I. 事業の位置付け・必要性について(研究開発の背景)

公開

## 【社会的ニーズ】

(ex)・エネルギー、インフラ分野で求められる極低温・腐食・高温・高圧など**極限環境への対応**  
・輸送機器分野・産業機械分野等で求められる**軽量化への対応** etc

**「高効率・省エネルギーの追求」「安全・安心かつ低炭素社会の実現」**

にかかる鉄鋼構造物や部材に対する要求は年々高度化。

**⇒既存技術の延長では対処困難**

## 【解決すべき課題】<NEDO委託-JRCM調査委員会(平成17年8月～平成18年2月)結果 国内鉄鋼需要業界85社>

a.高強度鋼板の加工技術 …自動車業界を中心に精力的な研究実施中

b.応力腐食割れ防止技術の開発 …化学プラントユーザー中心に精力的な研究実施中

c.高強度鉄鋼構造物の溶接技術

d.高耐熱鋼材の開発

e.鍛造部品の高強度化と切削性を両立する技術の開発

・実用化までに長期間必要

・領域を越えた基礎研究成果と知識の集約が必要

## 【シーズの進歩と取り組み手法】

「ナノスケールでの結晶組織制御」「原子レベルでの欠陥分析評価技術」

「レーザー応用溶接加工技術」「高度シミュレーションシステム」etc

**近年格段に進歩してきている新科学技術が融合できれば**

**材料技術革新の可能性高まる。**

最先端技術を有する鉄鋼メーカー、プラントメーカー、大学及び独法等  
研究機関の連携により、難題解決に挑戦

# I. 事業の位置付け・必要性について(事業の目的)

公開

高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる

(1)高級鋼厚板溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術  
及び金属組織制御技術を基本とする溶接材料技術の開発

(課題「高強度鉄鋼構造物の溶接技術」「高耐熱鋼材の開発」に対応)

(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適傾斜機能を付与  
する機械部品鍛造技術の開発

(課題「鍛造部品の高強度化と切削性を両立する技術の開発」に対応)

「鋼構造物、エネルギープラント等の高強度・高機能化・長寿命化」  
「自動車等の更なる軽量化」を実現。

これにより、安全・安心な省エネルギー社会を構築すると共に、日本製  
造業の国際競争力の更なる向上を図ることを目的とする。

# I. 事業の位置付け・必要性について(プログラムでの位置付け)

公開

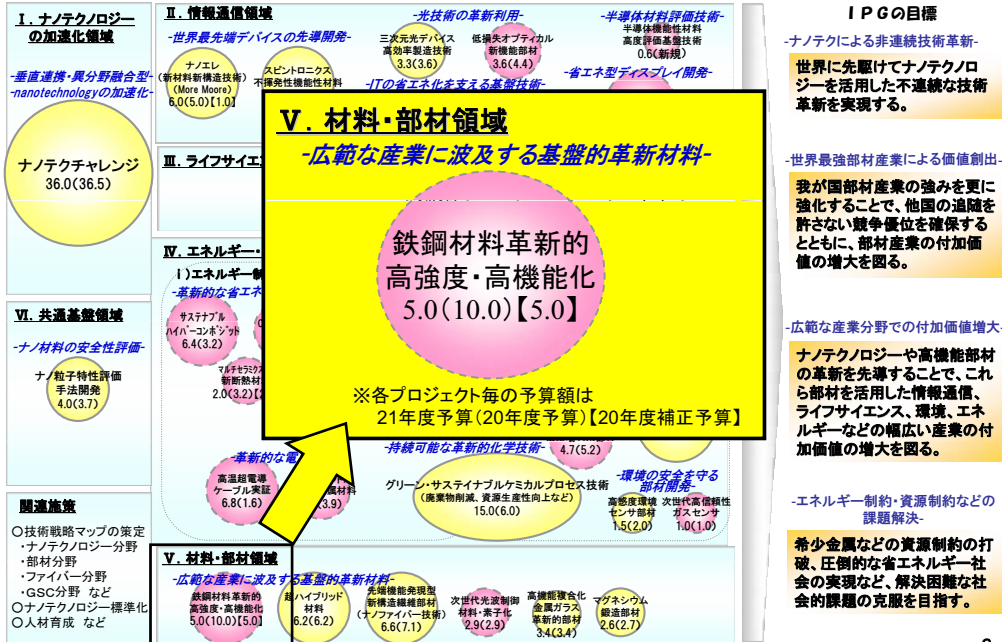
## ナノテク・部材イノベーションプログラム

### 2. ナノテク・部材イノベーションプログラム

【平成21年度予算額：188億円】

※各プロジェクト毎の予算額は21年度予算(20年度予算)【20年度補正予算】

○あらゆる分野に対して高度化・不連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立する。  
○我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服を可能とする。



# I. 事業の位置付け・必要性について(プログラムでの位置付け)

公開

## エネルギーイノベーションプログラム

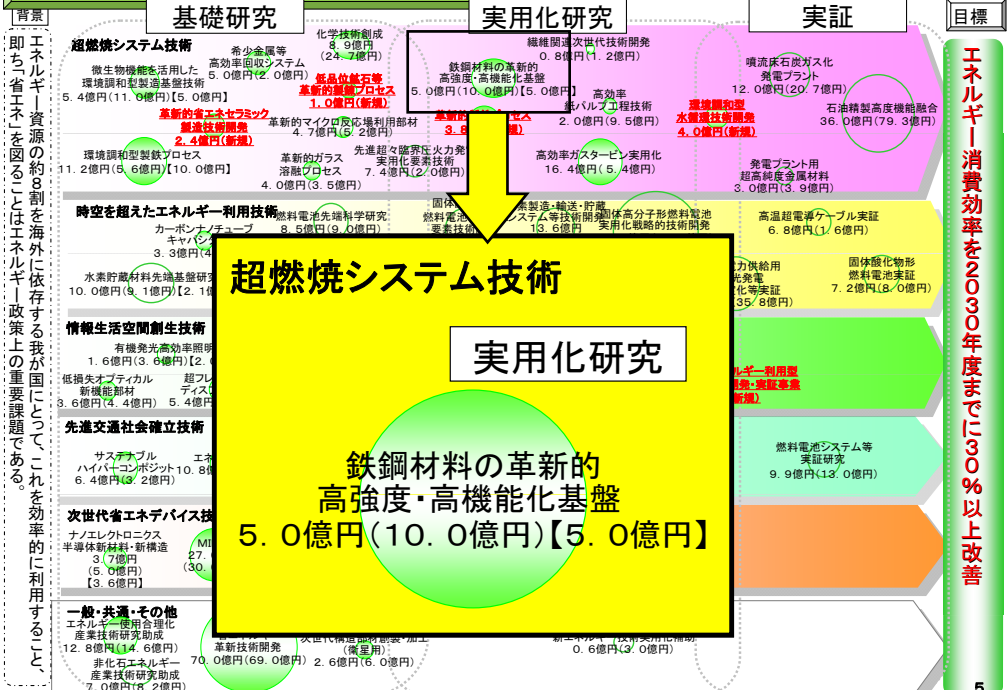
### 4. エネルギーイノベーションプログラム

#### ① 総合エネルギー効率の向上

【平成21年度予算案：707億円】

※基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。

※各プロジェクト毎の予算額は21年度予算(20年度予算)【20年度補正予算】





鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発は、

- 社会的必要性:大、国家的課題
- 鉄鋼業界の国際競争力の更なる強化にも貢献
- 研究開発の難易度:高
- 最先端の研究機関の連携が必要
- 投資規模:大 = 開発リスク:大



NEDOがもつこれまでの知識・実績を活かして推進すべき事業

**A. 省エネ効果(原油削減換算)**

(1) 高級鋼の革新的溶接技術

- ① 高級鋼厚板(高強度・低温用)溶接時の予熱・後熱フリー化 : 16万kL/年
- ② 亜臨界or超臨界火力発電プラントから  
超々臨界火力発電プラントへのリプレース : 380万kL/年

(2) 先端的制御鍛造技術

自動車鍛造部品の軽量化による燃費改善 : 109万kL/年



**505万kL/年の原油削減メリット = 1540億円/年のコスト削減効果**

<前提:原油=50ドル/barrel=314.49ドル/kl、1ドル=97円(平成21年4月上旬 経産省新聞情報)>

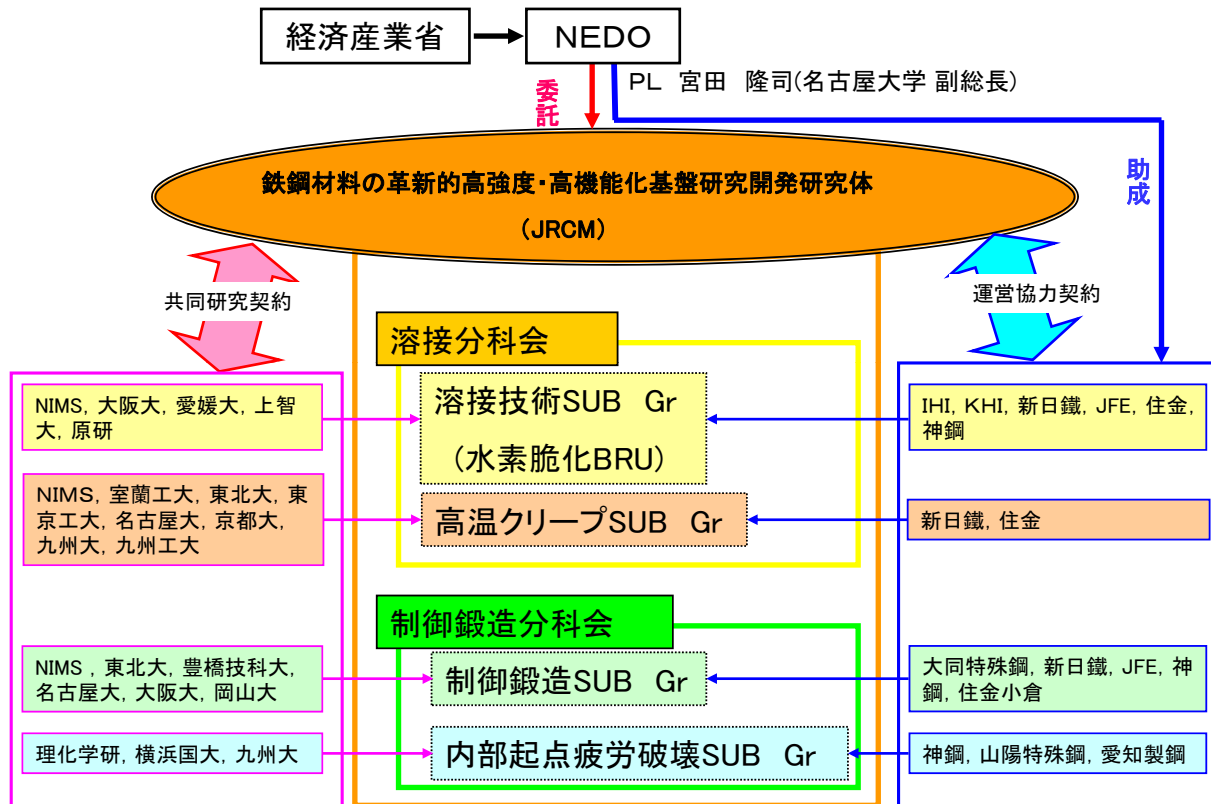
**B. 火力発電建設材料コスト削減**

**=54億円/基(100万KWh級)のコスト削減効果**

<前提:欧米のNi基合金のみによる建設に比較し、Ni基合金を1000ton→500tonに削減>

## II. 研究開発マネジメントについて(研究開発の実施体制)

公開



事業原簿 II-12

p.9/32

## II. 研究開発マネジメントについて(事業の目標)

公開

### <溶接分科会>

予熱無しで980MPa以上の高級鋼(現状400MPa)の溶接を可能とする溶接技術と材料技術の開発。

### <制御鍛造分科会>

降伏強度1000MPa以上(現状600MPa)を有する傾斜機能部材の鍛造技術の開発。

事業原簿 II-1~4

p.10/32

## II. 研究開発マネジメントについて(事業の目標)

公開



委託(JRCM,大学,国研)		助成(企業)	
溶接技術 SG	① 高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発	③ 高級鋼材の革新的溶接接合技術の開発	1) クリーンMIG技術の低温用鋼・980MPa級高強度鋼への適用性究明と継手性能評価 2) レーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接技術の980MPa級高強度鋼への適用と、制御手法、継手性能評価法の提示 3) 予熱・後熱なしに低温割れの抑止を可能とする980MPa級鋼用溶接材料の開発 4) 熱処理なしで割れない9Ni系低温用鋼用溶接材料の開発
	1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発 2) ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基盤技術の開発 3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究	6) 980MPa級継ぎ手の水素侵入による低温割れの解明・信頼性確保のための予測手法の構築	5) 溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計
	5) 溶接部水素侵入による低温割れ機構の研究		
水素脆化 BRU			
高温クリープ SG	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		
制御鍛造 SG	② 先端的制御鍛造技術の基盤開発	④ 先端的制御鍛造技術の開発	1) 高強度化・傾斜機能付与のための合金設計・プロセス開発 2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステムデータベースの構築
1) 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与と技術の研究 2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術の開発			3) 転動疲労メカニズム解明と非金属介在物組成・サイズ制御指針提示
内部起点疲労破壊 SG	3) 高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明		

事業原簿 II-1~4

p.11/32

## II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

公開

		H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	将来
溶接分科会	溶接技術 SG	クリーンMIG溶接	含有酸素量50ppm以下達成	→	→	→	→	【エネルギー・インフラ分野】 橋梁 LNGタンク  超々臨界火力発電所
		レーザー、アークハイブリッド溶接	板厚12mm貫通完全溶け込み溶接達成	→	→	→	→	
	溶接金属および信頼性評価	溶接金属開発、靱性47J(-40℃)	→	→	→	→	→	
水素脆化 BRU		水素挙動解析・破断限界取得(単純モデル)	→	→	→	→	【輸送機分野】 自動車部材(駆動系・足回り) 大型船舶 	
高温クリープ SG	700℃耐熱鋼の合金設計(3万トクリープ)	→	→	→	→	→		
制御鍛造 SG	析出強化最大化方策・微細粒化指針提示	→	→	→	→	→		
内部起点疲労破壊 SG	内部起点疲労破壊 SG	格子欠陥の水素存在状態定量・炭素の影響調査	→	→	→	→	→	
		組織硬さ分布予測システム構築(一般プロセス)	→	→	→	→	→	
		高強度部900~1000MPa、軟質部800~900MPa	→	→	→	→	→	
		初期き裂の3次元形態・進展挙動評価技術確立	→	→	→	→	→	
		介在物周辺の応力状況シミュレーション技術	→	→	→	→	→	

事業原簿 II-5~11

共通基盤(委託)

実用化基盤(助成)

p.12/32

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて(研究の運営管理)

公開

### ●NEDO主催による

#### 「技術推進委員会(年1回)」開催

外部有識者の先生からのご助言を  
研究体制を含めた運営管理に反映。

氏名	所属 部署
一柳 朋紀	(株)鉄鋼新聞社
国重 和俊	香川大学 工学部 材料創造工学科
粉川 博之	東北大学 大学院工学研究科
新田 明人	(財)電力中央研究所 材料科学研究所
※野本 敏治	東京大学
松川 不二夫	(財)日本自動車研究所 安全研究部

※は委員長

### ●PL主催による

#### 「研究委員会(年2回)」開催

PLのマネジメント(予算配分等の運営管理)  
に外部有識者からのご助言を反映。

氏名	所属 部署
※栗飯原 周二	東京大学
大堀 學	日本精工株式会社
酒井 拓	電気通信大学
高木 愛夫	東京電力株式会社
福神 健字郎	日産自動車株式会社
福田 祐治	パプコック日立株式会社
藤根 学	トヨタ自動車株式会社
松山晋作	前 神奈川工科大学
宮崎 建雄	ユニバーサル造船株式会社

※は委員長

### ●その他、以下の委員会を開催

「研究企画委員会(年4回)」PLを中心に研究内容の進捗確認と予算配分等の運営方針について協議

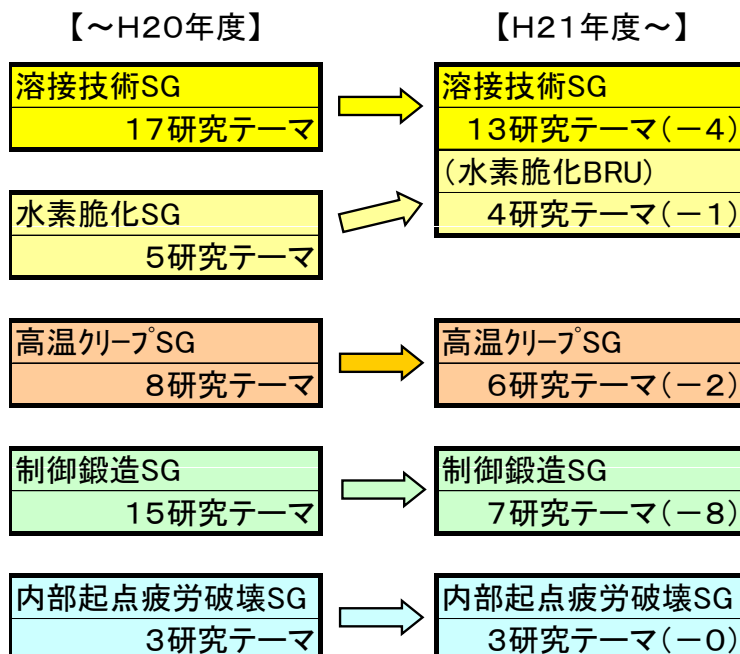
「各SG会議(年4回以上)」SGリーダーを中心に実務者レベルで研究内容の進捗確認と今後の方針を協議

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて(情勢変化への対応)

公開

### 研究体制の再編成と研究テーマの選択と集中 (H20.12. 技術推進委員会 評価結果への対応)

#### 主な変更点



(1) 出口の明確化を目的に、  
水素脆化SGを溶接技術SGに統合

(2) 研究テーマの選択と集中

<制御鍛造SG>

・「析出強化」「微細化」の2法で検討。

↓  
「析出強化」に集中

・委託最終目標の読替(案)

「降伏強度1000MPa以上で $\gamma$ 域加工でフェライト粒径2 $\mu$ m以下、 $\alpha$ 域および $\alpha+\gamma$ 域加工でフェライト粒径1 $\mu$ m以下の超微細粒の実現」

↓  
「降伏強度1000MPa以上を実現するVC析出形態と加工熱処理条件の明示」

## II. 研究開発マネジメントについて(情勢変化への対応)

公開

### 加速財源の投入

SG	年度	件名	金額(千円)
溶接技術SG	H19	高輝度光源装置	7,000
	H19	低温冷却装置装備5MN疲労・大変形引張装置	11,000
	H19	水素雰囲気溶接熱・応力サイクル再現装置	66,000
	H19	温度制御・計測システム装備 材料強度・破壊試験装置	12,000
	H19	高電流形電場指紋照合装置	12,000
水素脆化BRU	H19	サーマル電解放出型走査電子顕微鏡装置	38,000
高温クリープSG	H19	クリープ試験評価装置	23,000
	H20	組織・構造解析用試料高精度化装置	20,291
	H20	微小領域ひずみエネルギー解析装置	9,802
制御鍛造SG	H19	超微細結晶方位解析装置	33,000
	H19	捻り式熱間加工シミュレータ・高周波加熱装置および真空排気装置1式	22,000
内部起点疲労破壊SG	H19	非干渉型3chガウスメータ	20,000
	H20	超精密楕円振動切削装置	6,462

「高温クリープ時に起こる欠陥や内部組織変化挙動その場観察」  
 を陽電子消滅法を用いて世界で初めて成功  
 ⇒ 従来得られなかったクリープ損傷の機構解明が進捗  
 ⇒ 寿命予測式の精度向上に必須のデータを収集・蓄積

## II. 研究開発マネジメントについて(研究開発予算)

公開

### 研究開発予算

(K¥)

	H19年度		H20年度		H21年度		合計
	委託 (JRCM・大学・国研)	助成 (企業)	委託 (JRCM・大学・国研)	助成 (企業)	委託 (JRCM・大学・国研)	助成 (企業)	
溶接技術SG	295,918	74,283	220,249	92,658	240,552	74,338	997,998
水素脆化BRU	128,242	7,557	96,509	17,888	73,757	17,816	341,769
高温クリープSG	104,670	43,996	164,299	94,832	78,622	61,000	547,419
制御鍛造SG	150,463	154,940	114,162	150,571	130,355	135,774	836,265
内部起点疲労破壊SG	88,721	42,820	53,046	29,088	77,103	43,518	334,296
合計	768,014	323,596	648,265	385,037	600,387	332,446	3,057,745

約10.9億円

約10.4億円

約9.3億円

### Ⅲ. 研究開発成果(プロジェクトの概要)

公開

エネルギー資源の多くを海外に依存する我が国にとって、省エネルギーを図ることは、国として重要な課題である。本事業では鋼構造物やプラント、自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、鉄鋼を用いた鋼構造物および部材の超高機能化を目的に基盤的研究開発を行う。

具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる以下の開発を行う。

#### (1)高級鋼の革新的溶接技術

- ①980MPa以上の高級鋼(現状400MPa)の溶接を可能とする溶接技術と材料技術の開発
- ②700℃級超々臨界火力発電用耐熱鋼の開発
- ③980MPa級溶接金属の水素割れ(破断)防止のための「破断限界マスターカーブ」と「粒界水素量予測マスターカーブ」の構築

#### (2)先端的制御鍛造技術

- ①降伏強度1000MPa以上(現状600MPa)と900MPa以下の強度分布を有する傾斜機能部材の鍛造技術の開発
- ②高強度鍛造材のき裂発生・伝播機構の解明と材料力学と材料因子を考慮した寿命予測式の構築

この結果、鋼構造物、エネルギープラント等の高強度・高機能化・長寿命化の大幅な加速、および自動車等の更なる軽量化を可能とする最適傾斜機能部材の製造が可能となり、低炭素社会を実現すると共に、日本製造業の国際競争力の更なる向上を図る。

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の目標と特徴)

公開

溶接技術SG <担当研究項目>委託:① 1)~3), 助成:③ 1)~4)

#### <目標>

- ・高級鋼材の溶接部の強度・靱性・疲労・水素割れ等の課題を解決する施工法及び溶接材料の開発
  - \* クリーン溶接(純Ar雰囲気下でのMIG溶接および中厚板レーザー溶接)技術の確立
  - \* クリーンマルテンサイト高強度溶接金属組織設計の実現
  - \* 予熱・後熱処理なしで割れない溶接金属の開発
- ・開発技術を基に施工される鋼構造物での目標強度(980MPa以上)及び靱性(-40℃で47J以上)の達成。

#### <特徴>

- ・我が国が世界をリードする世界最先端の鋼材として、**高強度鋼HT980と極低温用鋼9%Ni鋼**を取り上げ、その溶接技術の革新を目指している。
- ・本開発では、**クリーンMIG溶接**に加えて、次世代先端溶接技術として**ファイバーレーザー溶接**において、大出力化とそれによる厚板(25mm厚)への適用を世界に先駆けて取り組んでおり、溶接方法の革新性に特徴がある。
- ・さらに、硬質で脆いマルテンサイトをいかに安全に利用するかが成功の鍵を握る高強度HT980級溶接金属の組織制御では、軟質の**残留オーステナイト組織**を少量混在させて、**強度・靱性・疲労・水素割れ等の従来課題を解決する新しい組織制御技術**の革新を狙っていることも特徴である。



### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の目標と特徴)

公開

水素脆化BRU <担当研究項目>委託:① 5), 助成:③ 6)

#### <目標>

- ・単純化された金属組織における格子欠陥と水素の相互作用エネルギーの定量化。
- ・メゾスケールでの応力状態における水素の挙動解析技術の基盤構築。
- ・複雑な金属組織における各種格子欠陥における水素存在状態の定量化。
- ・単純化した金属組織をもつ1000MPa高強度高での局所応力-局所水素量に基づく破断限界の取得。

#### <特徴>

- ・「980MPa級継ぎ手の水素侵入による低温割れ機構の解明・信頼性確保のための粒界破断限界(局所水素量、局所応力)の予測手法の構築」を目指し、**粒界水素量予測技術と破断限界予測技術の構築のため、計算研究と実験研究とで協力しながら研究を進める。**
- ・**計算研究では、近年著しく進展している計算技術を用いて、実験だけでは得がたい電子・原子レベルの知見を得ると共に、それらの知見を元に実験検証可能なマクロ量を予測するモデルを構築する。**
- ・**実験研究では、高精度化した実験で計算結果の検証と実験データベースの構築を実施。**

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の成果概要)

公開

#### <達成状況 評価基準>

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。



### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の成果概要-溶接技術SG①)

公開

検討項目	研究成果	達成状況
①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発(委託研究)	(1) 同軸複層ワイヤ法:同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により純Arによる <b>基本クリーンMIG溶接を実現(世界初)</b> した。安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、 <b>40ppm(平均値)の低酸素化を達成</b> した。 (2) 電離プラズマ法:新構造プラズマMIGトーチ(電極径最適化)と <b>プラズマ/MIG協調電流制御による基本溶接制御法(世界初)を開発</b> し、安定した高速溶接施工(50cm/min)を実現した。最速条件下で表面と内部欠陥防止と <b>酸素量24ppmを達成</b> した。	◎ ◎
①-2) ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発(委託研究)	(1) a. 集光特性適正化設計によりレーザー光軸上パワー密度分布を制御する <b>長焦点深度光学系</b> により、キーホールの実現を達成し、貫通完全溶込み溶接でJIS1類相当品質のポロシティの低減を達成。25kWによる <b>25mm厚溶接(世界初)を実施見込み</b> 。2パス隅肉平滑ビード形成の基礎技術となる最適狙い位置を導出した。 (2) レーザ後方ワイヤ添加と酸素含有(≧2%)シールドガス法による均質合金化指針提示を提示した。実用的なギャップ突合せ貫通溶接についてアークタンデムのハイブリッド化というビード表面形状制御の基礎技術指針を提示しそれを実現するトーチを開発した。	◎ ○
①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究(委託研究)	(1). 溶接凝固過程の <b>高時間分解その場観察システムを構築</b> し、溶接金属組織の <b>非平衡析出挙動の観察に成功(世界初)</b> 。観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑制に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。 (2) フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留γによるトラップ効果(放出ピーク温度の高温遷移:約200℃→300℃)を実証した。これにより予熱なしで溶接割れが生じない溶接金属組織の必要条件を明確化できる見込みを得た。 (3) 中性子回折法による定量的残留応力計測(継手では初)から、200~400MPaの残留応力低減に対応して疲労強度が上昇することが高Ni-Cr系溶接金属では確認された。 (4) クリーン溶接金属において、マルテンサイトに7%以上の残留γが存在するとき、疲労伝播速度が2.5~4倍遅延することを明示した。 (5) クリーン溶接金属(酸素含有20ppm)において-80℃で0.26mmの(安全)GTOD値を達成。15%の残留γ相導入で-196℃では約10倍の顕著な向上効果を確認した。	◎ ○ ○ ○ ○ ○
①-5) 溶接部水素侵入による低温割れ機構の研究(委託研究)	(1) 鉄中の空孔、転位、粒界、表面と水素の相互作用エネルギー(Eb)を第一原理計算と分子動力学法により定量的に決定。 <b>(世界初の成果、空孔&gt;転位芯&gt;粒界を明示)</b> (2) 各種格子欠陥のEbを実験的に求める基礎構築を達成。 <b>(世界唯一の低温昇温脱離分析装置の開発に成功)</b> (3) 1000MPa級鋼の破断応力を水素量4ppmまで実験的に取得。(応力と水素量の危険域を明示) (4) 水素粒界割れによる破断応力の低下を第一原理計算に基づき定量評価。 <b>(世界初の成果)</b>	◎ ◎ ○ ○ ○

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の成果概要-溶接技術SG②)

公開

検討項目	研究成果	達成状況
③-1) クリーンMIG技術の極低温用鋼・980MPa級鋼への適用性究明と継手性能評価(助成研究)	(1)クリーンMIG試作溶接装置を導入。9%Ni鋼に対するクリーンMIG溶接試験を実施し、 <b>溶接施工性ならびに溶接継手性能を把握</b> 。 (2)HT980鋼に対するクリーンMIG溶接試験を実施し、プロセスの棲み分け提示と試作装置仕様を決定。 <b>Cr-Ni系一次試作ワイヤにて予熱なしでの低温割れなし、および目標継手性能を達成</b> 。	○
③-2) レーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接技術の980MPa級高強度鋼への適用と、制御手法、継手性能評価法の提示(助成研究)	(1)レーザー溶接割れ試験法の開発と妥当性の検証。継手破壊データの収集。継手健全性を保障するモニタリング手法の開発。最終的に <b>12mm厚のJIS1類1パス貫通突合せ溶接技術確立の見込み</b> 。 (2)高強度レーザー溶接金属のマイクロ組織におよぼす化学成分の影響を調査し、目標特性(強度:980MPa、靱性:vE-40℃≧47J)を満足する <b>レーザー溶接金属の成分設計指針(組織制御)を明確化</b> 。またレーザー溶接金属に吸蔵される拡散性水素量の測定し、溶接割れ防止に向けた冶金学的基礎データを収集。	○
③-3) 予熱・後熱なしで低温割れの抑制を可能とする980MPa級鋼用溶接材料の開発(助成研究)	(1)Cr-Ni成分系において、①予熱なしで低温割れが回避される成分範囲、②目標以上の引張強さを得る成分範囲を把握でき、更に③酸素量を抑えることで高い衝撃値確保できることを把握した。 (2)耐低温割れ性、強度、靱性を同時に満足する溶接金属の推奨成分範囲を提示	○
③-4) 予熱・後熱なしで低温割れの無い9%Ni系低温用鋼溶接材料の開発(助成研究)	(1)9%Ni系溶接金属の強度・靱性に及ぼす入熱・酸素量・成分の影響を把握するデータを採取し、クリーンMIGプロセス条件範囲で強度・靱性が確保できる成分系を見出した。 (2)耐割れ性兼備に向け、偏析計算モデルを構築し、偏析挙動に及ぼす溶接条件・溶接材料成分の影響を把握できるようにした。	○
③-6) 980MPa級継ぎ手の水素侵入による低温割れの解明・信頼性確保のための予測手法の構築(助成研究)	(1)粒界、転位、空孔の <b>主要格子欠陥を変化した鉄鋼モデルサンプルを作製</b> 。これらを用いた低温TDS(委託)と第一原理計算(委託)から目標とした主要水素トラップサイトにおける水素存在状態の定量評価(脱離順位明示)を達成した。 (2)水素存在状態を可視化するマイクロプリント法により、粒界からの放出水素量が予歪(転位増)とともに低下すること確認し、 <b>粒界水素量に及ぼす転位の影響を定量的に見出した</b> 。 (3)TiC炭化物の各種水素トラップサイトのトラップエネルギーを解明し、炭素空孔位置が強いトラップサイトであることがわかった。 <b>(炭素空孔~1.3eV、整合界面~0.5eV、整合歪&lt;0.15eV、TiC格子間 非トラップサイト)</b> (4)固溶炭素は水素に対して強い反発となる最近接位置以外では極めて相互作用が弱く、影響が無視できることがわかった。	○

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の目標と特徴)

公開

#### 高温クリープSG <担当研究項目> 委託:① 4), 助成:③ 5)

##### <目標>

- ・700℃級超々臨界火力発電(A-USC)用耐熱鋼の提示
  - \* 650℃(フェライト系)、700℃(オーステナイト系)、750℃(Ni基合金系)で10万時間クリープ強度100MPaを実現できる鋼組成の提示
  - \* クリープ寿命診断精度 Factor of 1.2の高精度クリープ強度予測法の確立

##### <特徴>

従来の日本国内で蓄積された高温クリープデータと革新的組織劣化計測法(「スモールパンチクリープ試験法」、「陽電子消滅時間測定法」、「バネクリープ試験法」、「粒界性格変化評価法」および「組織自由エネルギー法」)による新規採取データとの総合化により、高温クリープ組織劣化機構の解明を図り、高温下での安定稼動を可能とする革新的耐熱鋼の合金設計指針の提示を行う。さらに、それらのデータを基に、高精度のクリープ強度予測技術の確立を図る。

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の成果概要-高温クリープSG)

公開

検討項目	成果	達成状況
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 (委託研究)	(1)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℃級耐熱材料の合金設計指針を世界で初めて明確化した。 ①650℃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 ②700℃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) (2)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。 ①組織劣化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	◎  ○
③-5) 溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計 (助成研究)	(1)新開発鋼のクリープ強度が中間目標を超過達成可能な組織モデル、合金設計指針に沿って試作・評価を実施し検証すると共に、フェライト鋼で実溶接継手強度係数0.7以上を実現できる組織制御技術(高B&メモリーイフェクト)を世界で初めて実証した。 ①650℃α系耐熱鋼:高B低N鋼の提案。安定粒界強化モデルの知見獲得。細粒域抑制技術で継手強度係数>0.7を実現。 ②700℃γ系耐熱鋼:粒界析出強化モデル合金を提案。オーバーマッチ継手効果も検証。 ③750℃Ni基合金:γ/γ' 整合析出型モデル合金試作。高延性。 液相拡散接合高延性継手も目処。 (2)各種組織因子パラメータによる強度評価法として新クリープ変形モデリング、新クリープ変形曲線予測法を提案。データベース収集+プラットフォーム概念提案。	◎  ○

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の目標と特徴)

公開

制御鍛造SG <担当研究項目> 委託: ② 1)2), 助成: ④ 1)2)

#### <目標>

- ・同一部材内で、高強度部1000MPa以上、軟質部900MPa以下の傾斜機能を発現できる鍛造技術の開発
  - \* VC析出制御および結晶粒径微細化技術による高強度化の達成
- ・組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステムの基盤構築
- ・プロトタイプ鍛造技術を生かした試作(コンロッド模擬部品等)

#### <特徴>

「フェライト+パーライト」組織において、相界面析出するVCの粒度および析出量(分布や平均粒子の半径分布)の最適化、結晶粒径の細粒化により高強度化を図る。  
また同時に、軟質化条件の最適化により高強度部と軟質部の造り込みプロセスを確立する。

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の成果概要-制御鍛造SG)

公開

検討項目	成果	達成状況
②-1) 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究(委託研究)	(1)VC析出の定量的評価手法を新たに確立した。 (2)VC析出強化は低温ほど大きいこと、等温状態では析出強化を最大にする保持時間が存在すること、加工による変態促進により高温でもVC析出強化を大きくできることを示した。	◎
②-2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術の開発(委託研究)	(1)VCのオーステナイト中、フェライト中、ならびに相界面析出予測モジュールを構築し、一般鍛造プロセスにおけるV添加非調質鋼の組織と0.2%耐力の分布予測可能な有限要素解析システムを構築。	◎
④-1) 高強度化・傾斜機能付与のための合金設計・プロセス開発(助成研究)	(1)低温での小さな加工ひずみと変態を同期させる技術(加工誘起析出と想定)により、強化部想定で0.2%耐力1085 MPa、軟質部想定で875MPaを達成 (2)VC析出と相変態を同期させた冷却制御により高強度化を果たすと同時に、加熱温度差付与で同一TP内、高強度部0.2%耐力 1094MPa、軟質部 537MPaを達成 (3)微細ラマ間隔パーライト+微細VCを最大限活用する高強度化手法により、0.2%耐力1350MPa達成と同時に、軟質部形成条件も解明し、同成分鋼で0.2%耐力750MPaを達成。	◎
④-2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステムデータベースの構築(助成研究)	(1) VC固溶、析出予測D/B構築: $\gamma$ 域でのVC析出挙動には $\gamma$ 粒界からの不均一核生成と、粒内での均一もしくは転位上への核生成の両方が存在し、モデルを構築するには両方を勘案する必要と判明 (2)逆変態D/B構築: V添加による粒成長抑制効果とその温度依存性に関する定量データを採取 (3)再結晶・粒成長D/B構築: V添加による再結晶の遅延(VC析出との相互作用大)の定量的データを採取 (4)相変態予測D/B構築: V添加によるフェライト/パーライト変態の遅延等の定量的データを採取 (5) 60水準の組織-特性D/B構築 ・VC析出強化量には加熱温度が大きく影響し、1000°C加熱で200MPa弱、1200°C加熱で400MPa弱の強化	○

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の目標と特徴

公開

#### -内部起点疲労破壊SG)

内部起点疲労破壊SG <担当研究項目> 委託: ② 3), 助成: ④ 3)

##### <目標>

- ・初期き裂の3次元形態と進展挙動の評価技術確立
- ・内部起点疲労損傷状況と初期き裂観察状況と合致する非金属介在物周囲の応力状況シミュレーション技術を構築・検証
- ・初期き裂形態に影響を及ぼす酸化物系介在物の各種要因を抽出

##### <特徴>

鋼材を高強度化したとき、および、制御鍛造により傾斜機能を付与したときに課題となる内部起点型疲労損傷の中で、最も重要かつ現象やメカニズムが知られていない**転動疲労**を取り上げる。**応力状況と損傷、ならびにき裂の発生・伝播状況の比較にもとづく、寿命予測式の提案。**

### Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の成果概要-内部起点疲労破壊SG)

公開

研究開発項目	成果	達成
②-3) 高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明(委託研究)	(1)マルテンサイト鋼において、電子線後方散乱回折法による疲労損傷評価基礎技術、介在物の高速・自動切削法による3次元構造観察技術、磁場顕微鏡法による疲労き裂先端の検出技術を開発し、疲労初期き裂の3次元観察技術の基礎を確立 ①ひずみ勾配の可視化と組織変化の検出に成功し、き裂形成がひずみ勾配領域であることを発見 ②フラットバイトと精円振動切削を組み込んだ3次元内部構造顕微鏡を構築し、鉄系材料内部の介在物・き裂の三次元形状をサブミクロン精度で自動観察する手法を世界で初めて実現 ③磁場顕微鏡観察において、応力拡大係数と磁場の相関性を発見 構造物の疲労劣化診断の新技術開発に成功	◎
④-3) 転動疲労メカニズム解明と非金属介在物組成・サイズ制御指針提示(助成研究)	(1)初期き裂生成に関する応力シミュレーション技術を構築した。 (2)応力シミュレーションと3次元観察結果との対応を検証し、初期き裂長さに対する影響因子を抽出した。(酸化物系介在物) (3)き裂生成-伝播に基づいた概略破壊モデルが提示できた。 <b>全寿命=伝ば寿命であって、初期き裂長さが寿命の支配要因である。[世界初の知見]</b> (4)非金属介在物大きさからの下限寿命予測を行った。(酸化物系介在物)	◎

### Ⅲ. 研究開発成果(成果の発表)

公開

- 研究成果は、学会発表のほか、パンフレットの作成・配布等により、成果の普及を積極的に実施した。
- 2008年4月に、2日間のシンポジウムを開催し、参加希望者400名、2日間延べ600名が参加され、研究成果に対する高い評価を得た。

	H19	H20	H21 ※	計
研究発表・講演	27件	132件		159件
うち査読付き論文	6件	38件		44件
特許出願	2件	8件	(9件)	10+(9)件
受賞実績			1件	1件
新聞・雑誌等への掲載	10件	3件		13件
シンポジウム開催			1件	1件

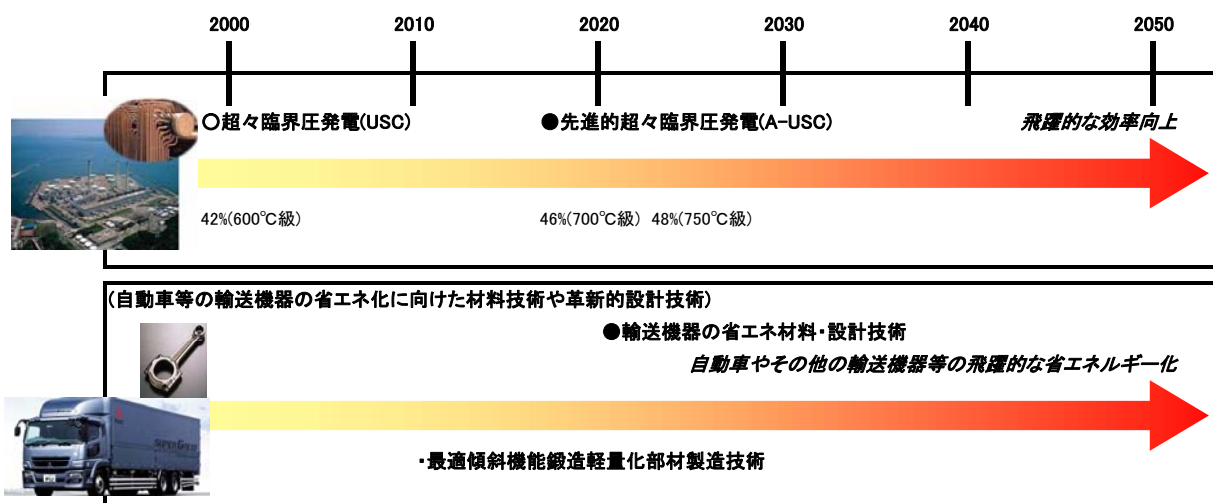
※ : 平成21年度5月29日現在  
 (括弧) : 平成21年度内の実施予定案件

### Ⅳ. 実用化の見通し(成果の意義)

公開

- 日本の技術政策テーマとして位置づけられており、汎用性が大きく、その研究成果が期待されている。

#### 本研究成果の実用化タイムスケジュール



(METI資料より抜粋)

●実用化の見通しは経営戦略に基づくことから、詳細は各社から報告。



## IV. 実用化の見通し(成果の意義)

公開

●下記の具体的出口ニーズ、メリットに対応したプロジェクトであり、研究成果の実用化の可能性および汎用性は非常に高い。

### A. 省エネ効果(原油削減換算)

#### (1) 高級鋼の革新的溶接技術

①高級鋼厚板(高強度・低温用)溶接時の予熱・後熱フリー化 : 16万kL/年

②亜臨界or超臨界火力発電プラントから  
超々臨界火力発電プラントへのリプレイス : 380万kL/年

#### (2) 先端的制御鍛造技術

自動車鍛造部品の軽量化による燃費改善 : 109万kL/年



**505万kL/年の原油削減メリット = 1540億円/年のコスト削減効果**

<前提: 原油=50ドル/barrel=314.49ドル/kl、1ドル=97円 (平成21年4月上旬経産省新聞情報)>

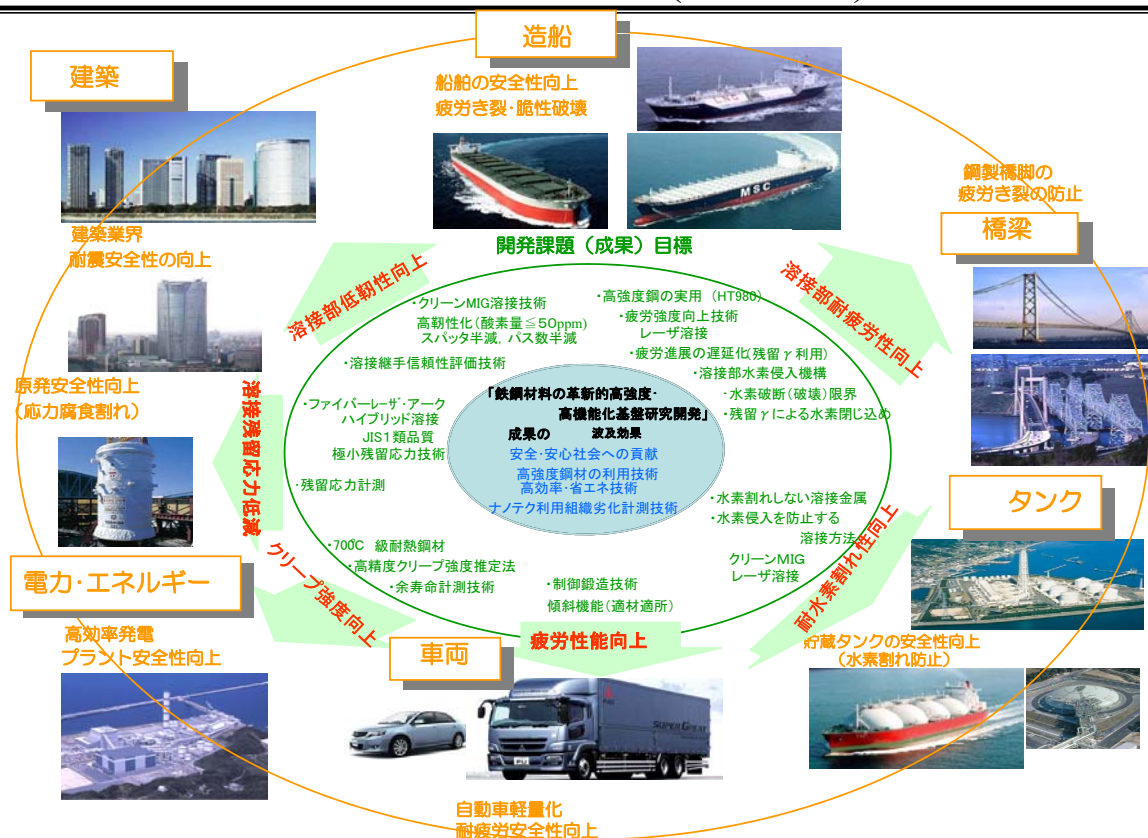
### B. 火力発電建設材料コスト削減

**=54億円/基(100万KWh級)のコスト削減効果**

<前提: 欧米のNi基合金のみによる建設に比較し、Ni基合金を1000ton→500tonに削減>

## IV. 実用化の見通し(波及効果)

公開



# 「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）

## 【溶接技術SG(委託)】

### ①高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発

- ①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発
- ①-2) ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基盤技術の開発
- ①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発  
および溶接継手信頼性評価技術の研究

（（財）金属系材料研究開発センター，（独）物質・材料研究機構，大阪大学，愛媛大学）

平成21年7月3日（金）

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



# 1. 背景

公開

## 溶接技術の現状と基本計画目標達成のための研究項目

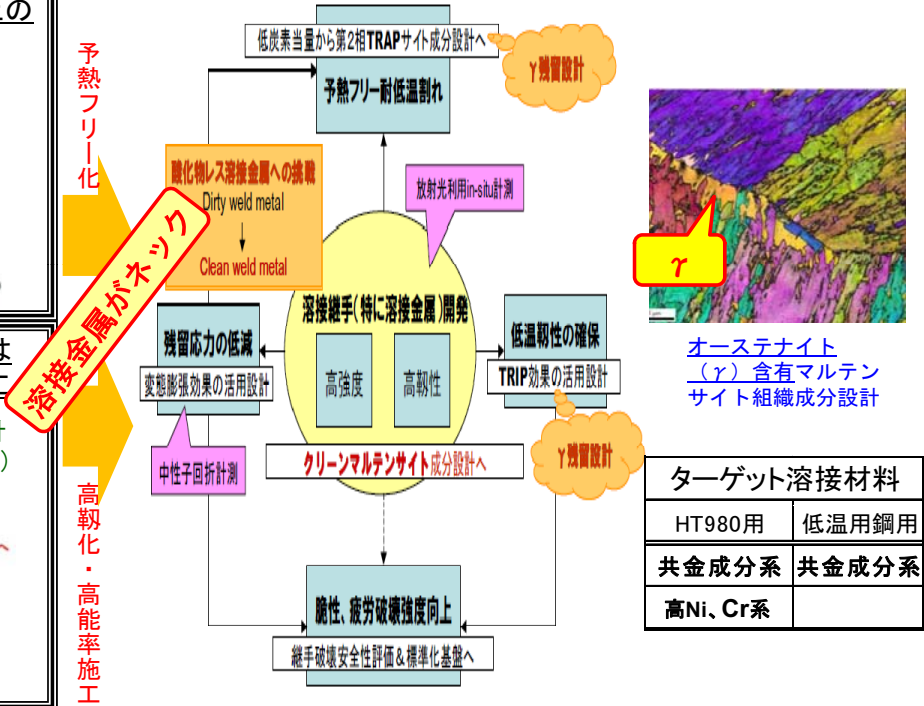
**高級鋼の実用継手の現状**  
**低温割れ**には100°C以上の  
予熱不可避

低炭素当量成分設計

**高強度で靱性確保**には  
**低エネルギー多パス溶接施工**

微細フェライト組織設計  
(オキサイドメタラジー)

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究



# 1. 背景

公開

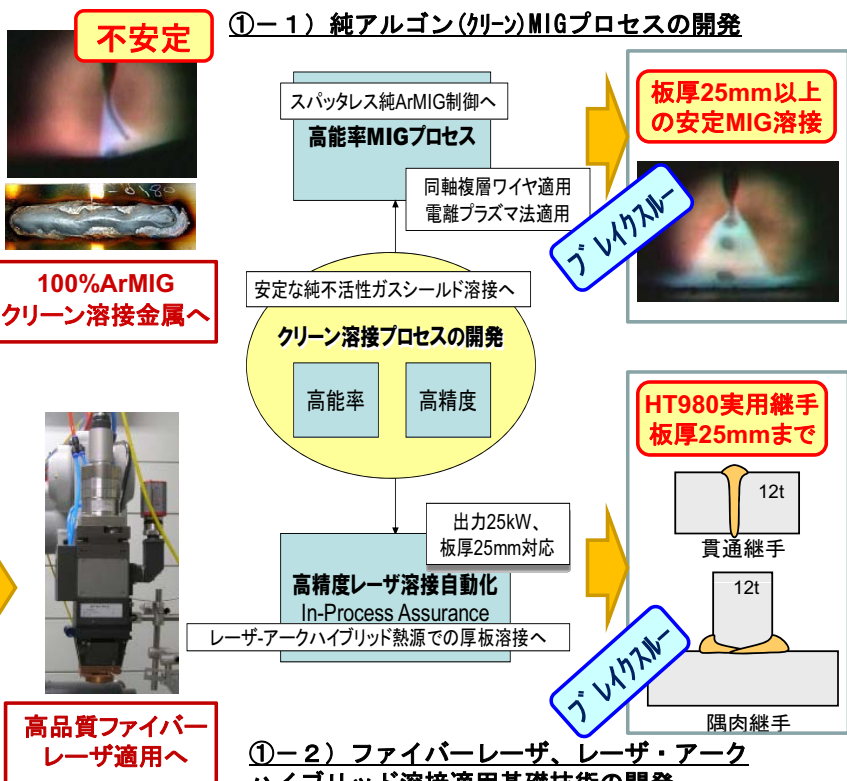
## 溶接技術の現状と基本計画目標達成のための研究項目

**実用アーク溶接の現状**  
**高エネルギー安定MIG/MAG**  
アーク溶接  
ダーティ溶接金属  
含有酸素>200ppm  
(98%Ar-5%O<sub>2</sub> MIG)

**低エネルギー高品質TIG溶接**  
クリーン溶接金属  
含有酸素<50ppm

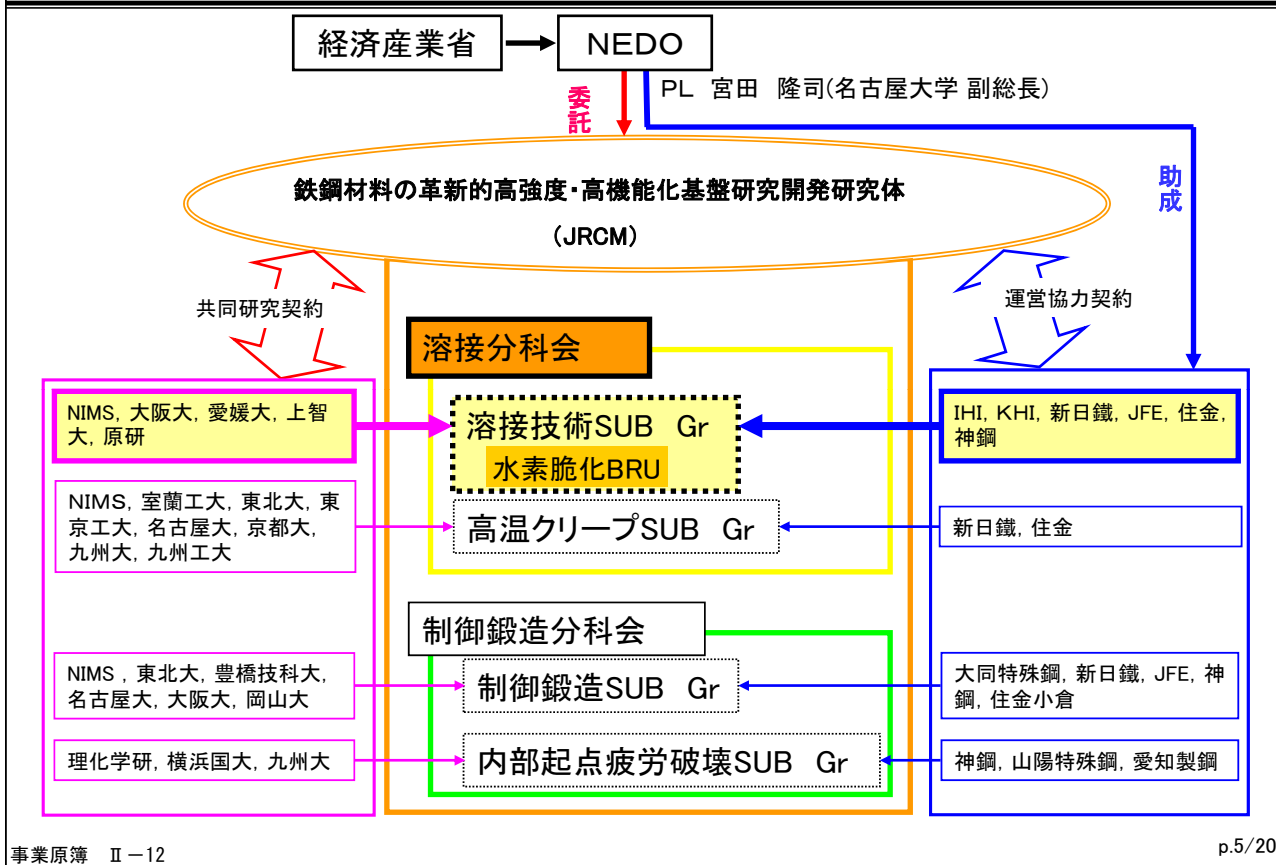
**中厚板レーザー溶接の現状**  
**高出力CO<sub>2</sub>レーザー溶接**  
高レーザー品質  
ファイバー伝送不可  
(出力: ~45kW)

**YAGレーザー溶接**  
低レーザー品質  
ファイバー伝送可  
(出力: ~10kW、薄板主流)



## 2. 研究開発の実施体制

公開



## 3. 開発目標と達成状況

公開

### ①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

論文: 1件

研究開発項目	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り組み
①-1) クリーンMIG溶接プロセス技術の開発	基本クリーン溶接制御法を開発し、溶接金属の含有酸素量50ppm以下を達成。	実用的な溶接構造継手を対象に、開先狭隘化により、25mm厚鋼板での溶接パス数を1/2、スパッタ発生率を1/2に減化した高能率・クリーン溶接プロセス基盤技術を達成	同軸複層ワイヤ法: 同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により純Arによる <b>基本クリーンMIG溶接を実現(世界初)</b> した。安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、 <b>開先内多層盛で40ppm(平均値)の低酸素化を達成。</b>	◎	実用溶接構造継手(開先内)溶接施工性を可能とする実用クリーンMIG制御技術の確立。
			電離プラズマ法: 新構造プラズマMIGトーチ(電極径最適化)と <b>プラズマ/MIG協調電流制御による基本溶接制御法(世界初)</b> を開発し、安定した高速溶接施工(50cm/min)を実現した。最適条件下で表面と内部欠陥防止と <b>酸素量24ppmを達成</b> した。	◎	アークプラズマの安定性と溶接ビードのぬれ性を制御するプラズマMIG熱源分布制御技術の最適化。 スパッタ低減溶滴移行制御と高能率狭幅多層溶接制御の確立。

青字: 成果キーワード、赤字: 超過成果

◎: 超過達成見込み

### 3. 開発目標と達成状況

公開

#### ①-2)ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

論文: 3件

研究開発項目	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り組み
①-2)ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発	a. 板厚12mmの高強度鋼溶接継手の溶接欠陥発生機構を解明し、溶接品質がJIS1類相当の貫通完全溶け込み溶接、及び2パス隅肉溶接継手製作のための基盤技術の確立。	a. 板厚25mmの高強度鋼において、多層突き合わせ継手及び隅肉継手をJIS1類相当の品質で形成する為の欠陥防止技術の開発	a. 適正収差制御による長[焦点深度]光学系 (AF0) を開発。これによるレーザ光軸上パワー密度分布制御でキーホールの安定化を実現して貫通完全溶込み溶接でJIS1類相当品質のポロシティの低減を達成。25kWによる25mm厚溶接(世界初)を実現見込み。また良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザの最適位置関係を導出した。	◎	板厚25mm厚溶接への展開が鍵。実用溶接を想定した25kW大出力溶接条件の最適化による溶接構造継手の製作とその安全性評価を進める。
	b. 効率的なワイヤ添加制御法及び均質合金化プロセス並びにビード表面形状制御の基盤技術の確立するための指針の提示。	b. 効率的なワイヤ添加制御法及び均質合金化プロセス、さらにビード表面形状制御の基盤技術の確立。	b. レーザ先行ワイヤ添加と酸素含有(≥2%) シールドガス法による均質合金化指針を提示した。レーザ先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。	○	25kW実用溶接を想定した非貫通溶接における均質合金化と欠陥防止技術の確立。 25kW実用溶接を想定した、滑らかな余盛形状形成の最適条件確立。

青字: 成果キーワード、赤字: 超過成果

◎: 超過達成見込み、○: 達成見込み

### 3. 開発目標と達成状況

公開

#### ①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

論文: 8件

研究開発項目	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り組み
①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究	a. 溶接金属組織の形成過程と化学組成の関係に関する基礎データベースの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>大型の溶接継手で予熱無しでも溶接割れが生じないための要件、及び強度980MPaと良好な靱性(-40°Cで47J以上)を得るための要件を明確化。</li> <li>予熱フリーでTIG溶接の2倍の効率で溶接施工できる9%Ni鋼用溶接プロセス条件下で、耐力が590MPa以上、強度が690~830MPa、-196°Cでの靱性値が50J以上を達成できる要件の明確化。</li> <li>継手部の残留応力適正制御技術の提示と、大型継手での破壊性能・信頼性評価技術の確立</li> </ul>	a. 溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功(世界初)。観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. b. 実験室規模の中間成果を大型溶接継手による最終成果達成に向けて進めるためにHT980鋼と9%Ni鋼ともに実構造体溶接技術を確立して溶接割れ防止要件や強度靱性確保要件の明確化を進める。</li> <li>c. d. 強度靱性の性能バランスを考えながら、残留γの利用法を具体化最適化するとともに、残留応力適正制御技術の提示と大型継手での破壊性能・信頼性評価を行う。</li> </ul>
	b. 予熱なしで溶接割れが生じない溶接金属組織の必要条件とクリーン溶接金属で高靱性が得られる溶接金属組織の必要条件の明確化		b. フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留γによるトラップ効果(放出ピーク温度の高温遷移: 約200°C → 300°C)を実証した。マイクロ組織の必要条件の導出のため、成分系や溶接熱履歴から残留γを予測する基本ツールを完成した。	○	
	c. 継手部残留応力と疲労強度の関係の定量化		c. 中性子回折法による定量的残留応力計測技術を確立し疲労強度との関係の定量化を達成見込み。	○	
	d. 溶接金属中の残留γ相による疲労強度、脆性破壊強度向上の条件の明示		d. クリーン溶接金属において、マルテンサイトに7%以上の残留γが存在するとき、トリップ効果により疲労き裂の進展が2.5~4倍遅延することをFMSにより明示した(世界初)。 d. 溶接金属のクリーン化(酸素含有20ppm)と15%の残留γ相導入で-196°Cでは約10倍の顕著な向上効果を確認した。	◎	

青字: 成果キーワード、赤字: 超過成果

◎: 超過達成見込み、○: 達成見込み



# 4. 検討内容

公開

## 同軸複層ワイヤ法

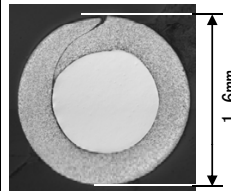
### ①-1)クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により純Arによる**基本クリーンMIG溶接を実現(世界初)**した。安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、**40ppm(平均値)**の低酸素化を達成した。

#### 同軸複層構造ワイヤの試作

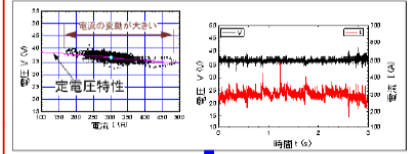
開発した複層ワイヤ	設計のポイント
低温用9%Ni鋼用共合金系(11%Ni系)	内外層材の融点差制御設計 芯材(内材)：11Ni材(1440℃) フープ(外材)：軟鋼(1530℃)
HT980MPa鋼用高Ni, Cr高合金系	内外層材の融点差制御設計 芯材(内材)：試作材(1400℃) フープ(外材)：SUS430(1500℃)
HT980MPa鋼用共合金低合金系	内外層界面にカリウム塗布。

#### 定電流電源特性でのパルス波形制御法の開発

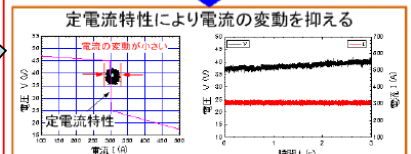


試作同軸複層ワイヤの断面写真(例)

従来の定電圧特性電源では、電流の安定化は困難



電源制御を可能とする安定な系を構成する



陰極点により電圧は変動するが、試作中の制御装置により電圧制御が可能である。

#### 達成溶接金属酸素量

溶接方法	溶接金属酸素量
従来MIG法	230ppm
従来TIG法	30ppm
同軸複層クリーンMIG法	40ppm

**基本クリーンMIG溶接を実現(世界初)と40ppmの達成**

良好なV開先内多層溶接を達成



ワイヤ：9Ni用複層ワイヤ(1.6mm)  
414A、31V、35cm/min  
60度V開先

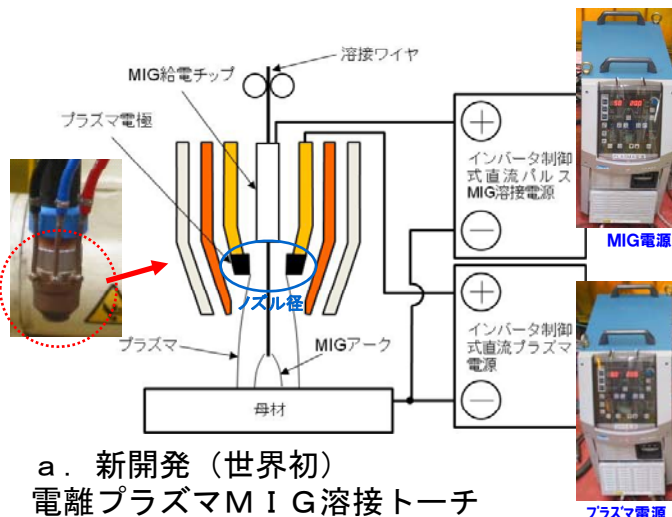
# 4. 検討内容

公開

## 電離プラズマ法

### ①-1)クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

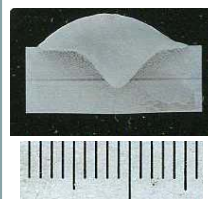
新構造電離プラズマMIGトーチ(電極径最適化)とプラズマ/MIG協調電流制御による**基本溶接制御法(世界初)**を開発し、安定した高速溶接施工(50cm/min)を実現した。最適条件下で表面と内部欠陥防止と酸素量**24ppm**を達成した。



a. 新開発(世界初)電離プラズマMIG溶接トーチ

b. 協調電流制御(世界初)

ノズル径: 3 mm,  
溶接速度: 50 cm/min



安定した溶接と溶接金属中の酸素量24ppmを達成

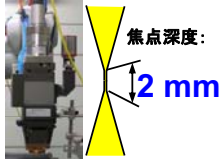
# 4. 検討内容

公開

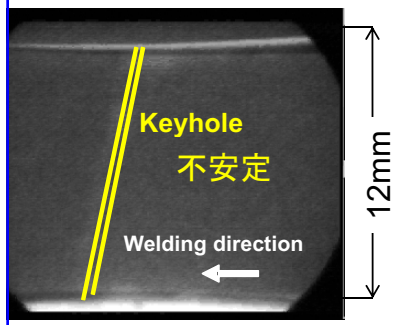
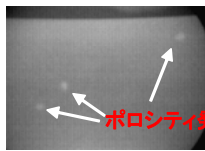
## ①-2)ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

(AFO:Advanced Focus Optics)  
レーザー光軸上パワー密度分布を制御する**長焦点深度光学系**により、キーホールの安定化を実現し、貫通完全溶込み溶接でJIS1類相当品質のポロシティの低減を達成。

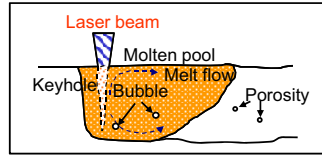
スポット径:  
200  $\mu\text{m}$



従来のレーザー溶接ヘッド

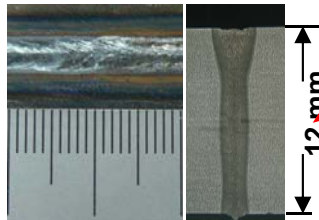


**25kW加速導入で25mm厚溶接実現 (世界初)**  
(H21.9稼働予定)



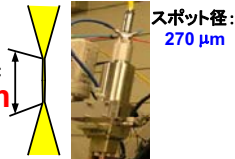
レーザー溶接現象解明

無欠陥溶接継手を達成  
ギャップ0 mm,  
溶接速度1 m/min

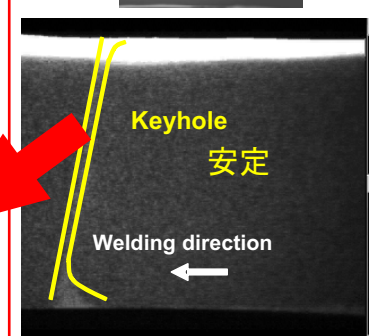


ビード形状 断面形状

スポット径:  
270  $\mu\text{m}$



長焦点深度集光溶接ヘッド



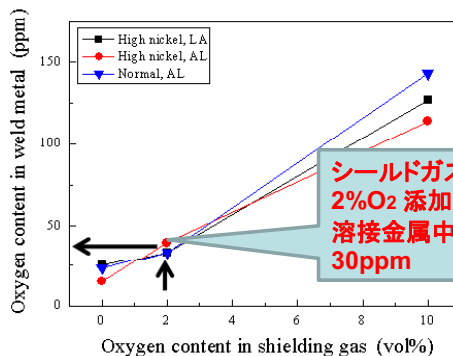
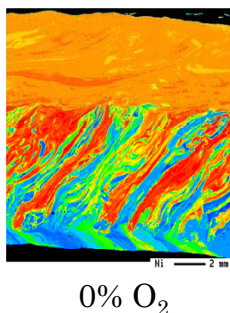
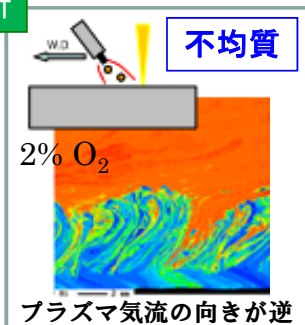
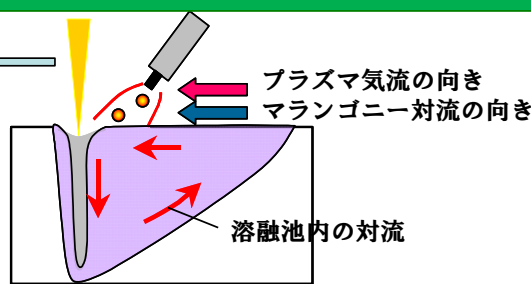
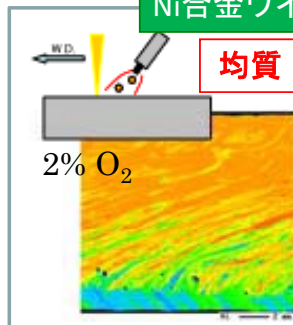
# 4. 検討内容

公開

## ①-2)ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

レーザー先行ワイヤ添加と酸素含有 ( $\geq 2\%$ ) シールドガス法による均質合金化指針を提示した。

Ni合金ワイヤ(MIGアーク)使用して、Niの攪拌度合解析



シールドガスへの2%O<sub>2</sub> 添加でも、溶接金属中酸素は30ppm

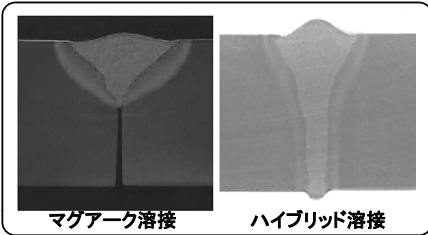
酸素 $\geq 2\%$ でキーホールへ向かうマランゴニー対流とプラズマ気流との相乗効果が有効である。

# 4. 検討内容

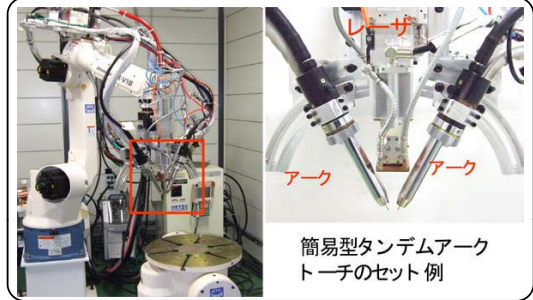
公開

## ①-2)ファイバーレーザー、レーザー・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

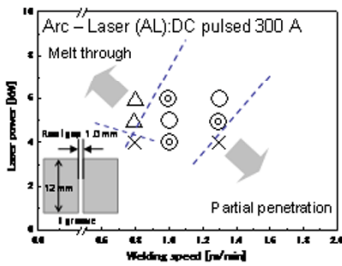
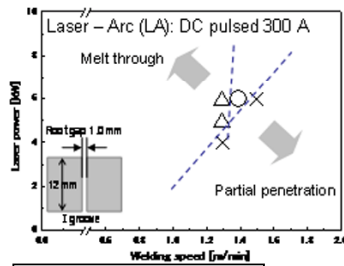
良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザーの最適位置関係を導出。レーザー先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。



ハイブリッド溶接でのアークのタンデム化によりビード表面形状制御を可能とした

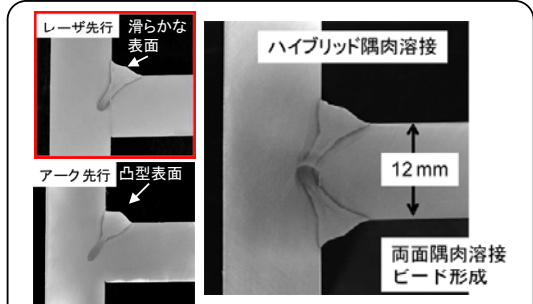


簡易型タンデムアークトーチのセット例



◎: Full penetration sound bead;  
○: Full penetration sound bead with small undercut;  
△: Full penetration with melt through;  
×: Partial penetration

アーク・レーザーの最適位置関係および適正条件範囲を導出



極小入熱で滑らかな余盛形状を有する両面隅肉溶接ビード形成法を提案

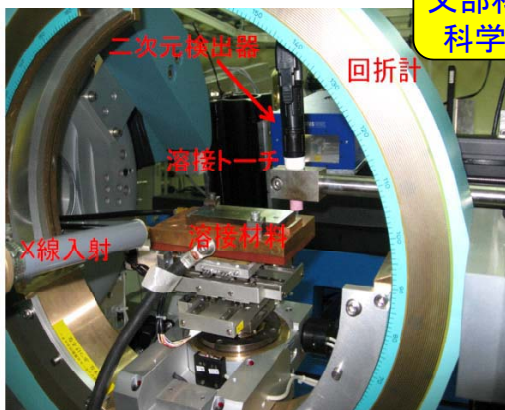
# 4. 検討内容

公開

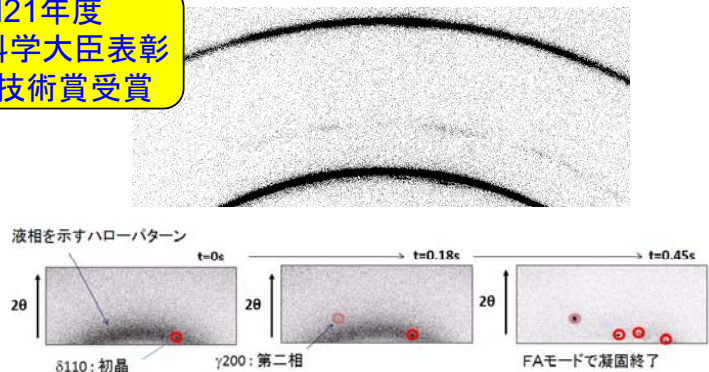
## ①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

強力X線放射光による溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功(世界初)した。この観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。

H21年度  
文部科学大臣表彰  
科学技術賞受賞



高温加熱炉系その場観察システム (46XUビームライン@SPring-8)



凝固割れ発生過程を観察し、凝固過程と割れ発生を関連付け、FA凝固モードとAF凝固モードの両モードの成分で凝固割れ抑止可能を提示した。



## 4. 検討内容

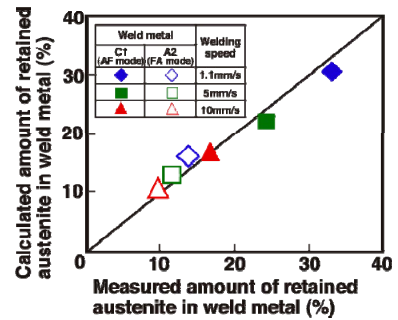
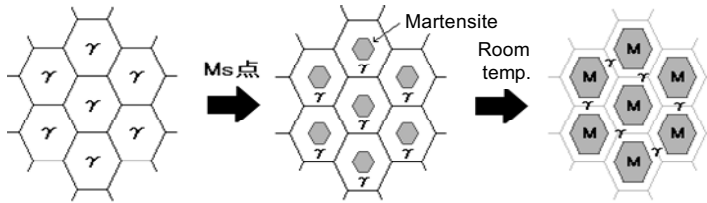
公開

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性  
溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

### 成分と溶接条件から残留γ量を予測するツールの開発

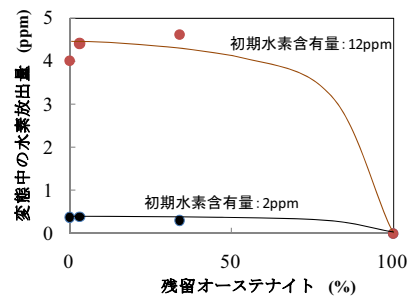
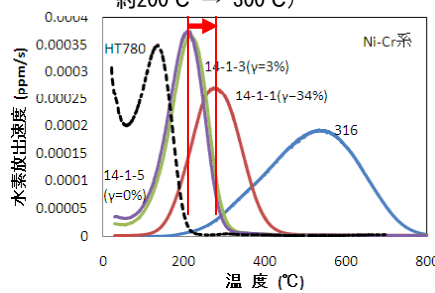
$$[\gamma \text{ 量}] = 130 + 296C + 64Mn + 7Ni - 17Cr \text{ (mass\%)}$$

凝固モード遷移を考慮して、残留γの生成速度論的解析から残留γ生成量の計算に成功



放出ピーク温度の高温遷移  
約200°C → 300°C

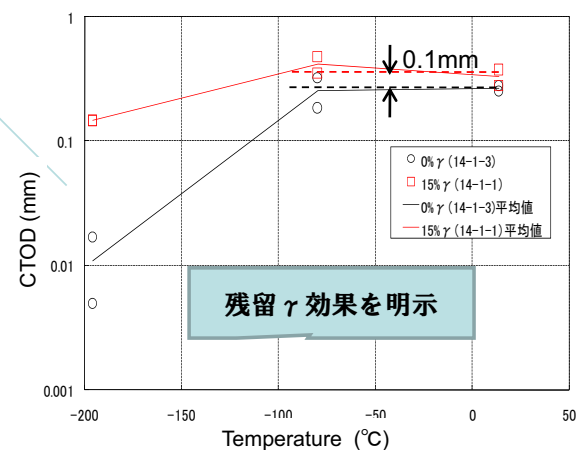
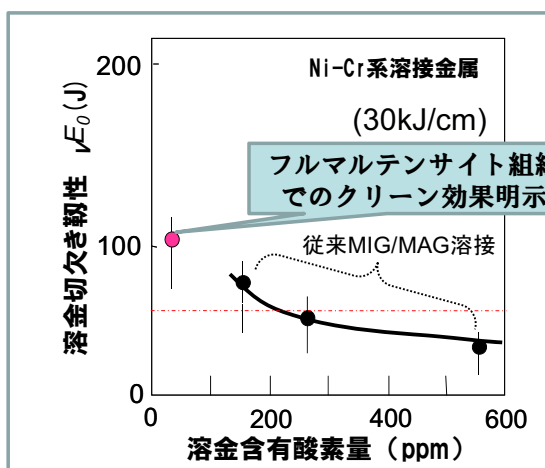
フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留γによるトラップ効果を実証した。



## 4. 検討内容

公開

①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性  
溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究



Charpy試験において、溶接金属酸素含有量20ppmで、吸収エネルギー105J (平均)

室温～-80°CのCTOD試験で、クリーンフルマルテンサイト組織成分で0.26mm (平均)、15%残留γで0.35mm (平均)のCTOD値を確認。残留γが靱性向上に有効であることを明示

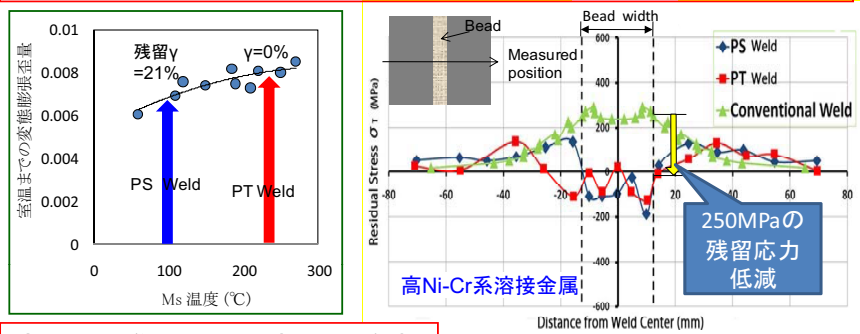
-196°Cの試験温度では、残留γ効果が顕著になり、フルマルテンサイト組織の約10倍の靱性向上となることを明示



## 4. 検討内容

### ①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究

中性子回折から合金溶接金属との残留応力の相違を定量的に明示

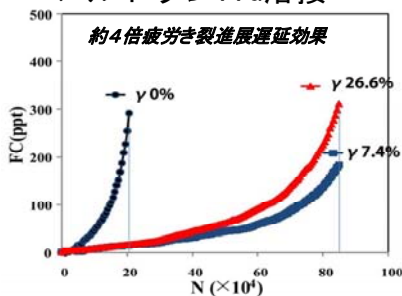


合金系ワイヤの溶接継手に比して、250MPaの残留応力低減を明示し、疲労強度向上が示唆できた。100°C<Ms点<250°Cの成分系での残留応力低減効果は、ほぼ同等であることを明示。

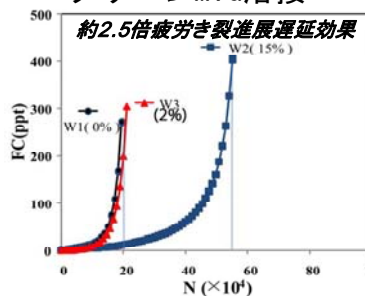
現在、疲労試験を実施中で、疲労強度との関係定量化を達成できる見込み

疲労き裂進展遅延に残留 $\gamma$ は有効

メルトランTIG溶接



クリーンMIG溶接



溶接金属の疲労き裂進展時間を、開発電場指紋照合装置(FMS\*)で測定し、7%以上の $\gamma$ 含有で疲労キレツ進展時間が2.5~4に遅延することを発見し、疲労寿命向上効果を明示した。

\*FMS: Finger Print Monitoring System

## 5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

### ①-1)クリーンMIG溶接プロセス技術の開発

基本クリーン溶接制御法を開発し、溶接金属の含有酸素量50ppm以下を達成する目標に対して、同軸複層ワイヤ法では同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により、また電離プラズマ法では新構造プラズマMIGトーチ（電極径最適化）とプラズマ/MIG協調電流制御によりそれぞれ純Arによる基本クリーンMIG溶接を世界に先駆け実現した。また、それぞれ安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、十分に50ppm以下の低酸素化を達成した。

今後は、最終目標達成に向けたスパッタ低減溶滴移行制御や高能率狭幅多層溶接制御などの実用溶接構造継手（開先内）溶接施工性を可能とする実用クリーンMIG制御技術へ開発を展開する。

## 5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

### ①-2) ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基礎技術の開発

a. HT780板厚12mmの高強度鋼溶接継手の溶接欠陥発生機構を解明し、溶接品質がJIS1類相当の貫通完全溶け込み溶接、及び2パス隅肉溶接継手製作の為の基盤技術の確立を達成する目標に対して、板厚方向のレーザパワー密度低下を主因とする溶接欠陥発生機構の解明に基づき、高パワー密度の安定維持を実現する長焦点深度光学系を開発してJIS1類相当品質の貫通完全溶け込み溶接を達成した。25mm厚溶接に着手見込み（世界初）。また良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザの最適位置関係を導出した。

今後は、HT980板厚25mm厚の実用溶接に向けた25kW大出力溶接条件の最適化に進み、安全性評価のための溶接構造継手の製作を実施する。

b. 効率的なワイヤ添加制御法及び均質合金化プロセス並びにビード表面形状制御の基盤技術を確立するための指針の提示目標では、レーザ先行ワイヤ添加と酸素含有（ $\geq 2\%$ ）シールドガス法による均質合金化指針を提示した。レーザ先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。

今後は25 kW-25mm厚の実用溶接を想定した非貫通溶接における均質合金化と欠陥防止技術の確立するとともに、25mm厚実用溶接を想定したレーザ・アークハイブリッド溶接法の最適条件を確立する予定。

## 5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

### ①-3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発 および溶接継手信頼性評価技術の研究

a. 溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功（世界初）。観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。

b. フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留 $\gamma$ によるトラップ効果（放出ピーク温度の高温遷移：約200°C → 300°C）を実証した。マイクロ組織の必要条件の導出のため、成分系や溶接熱履歴から残留 $\gamma$ を予測する基本ツールを完成した。

今後は、実験室規模の中間成果を大型溶接継手による最終成果達成に向けて進めるためにHT980鋼と9%Ni鋼ともに実構造体溶接技術を確立して溶接割れ防止要件や強度靱性確保要件の明確化を進める。

c. 中性子回折法による定量的残留応力計測技術を確立し疲労強度との関係の定量化を達成見込み。

d. クリーン溶接金属において、マルテンサイトに7%以上の残留 $\gamma$ が存在するとき、トリップ効果により疲労き裂の進展が2.5～4倍遅延することをFMSにより明示した（世界初）。

d. 溶接金属のクリーン化（酸素含有20ppm）と15%の残留 $\gamma$ 相導入で-196°Cでは約10倍の顕著な向上効果を確認した。

今後は、強度靱性の性能バランスを考えながら残留 $\gamma$ の利用法を具体化最適化するとともに、残留応力適正制御技術の提示と大型継手での破壊性能・信頼性評価を行う。

# 「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)

## 【溶接技術SG(委託)】

- ①-5) 溶接部水素侵入による低温割れ機構の研究  
(財)金属系材料研究開発センター, (独)物質・材料研究機構, (独)日本原子力研究開発機構,  
大阪大学, 上智大学)

平成21年7月3日(金)

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
  - (1) 水素の存在状態と拡散移動
  - (2) 水素による破壊現象
5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

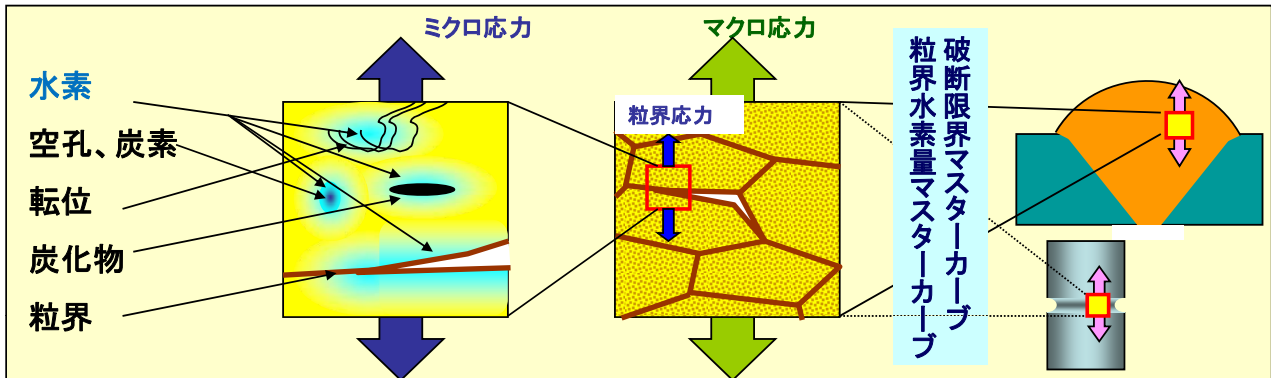
研究開発項目①「高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発」  
全体の最終目標「予熱なしで980MPa以上的高级鋼(現状400MPa)  
の溶接を可能とする溶接技術と材料技術の基盤を確立する」

# 1. 背景

公開

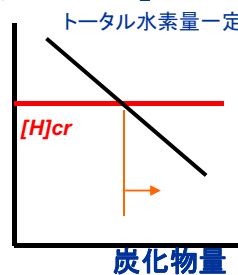
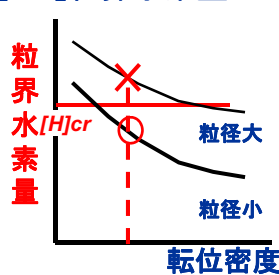
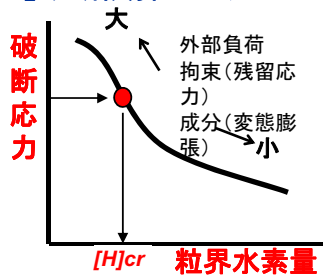
## 助成研究の目標

### ■低温割れ(水素脆化)現象の階層モデル



### ■低温割れ防止技術～2つのマスターカーブ

【破断限界マスターカーブ】 【粒界水素量マスターカーブ】



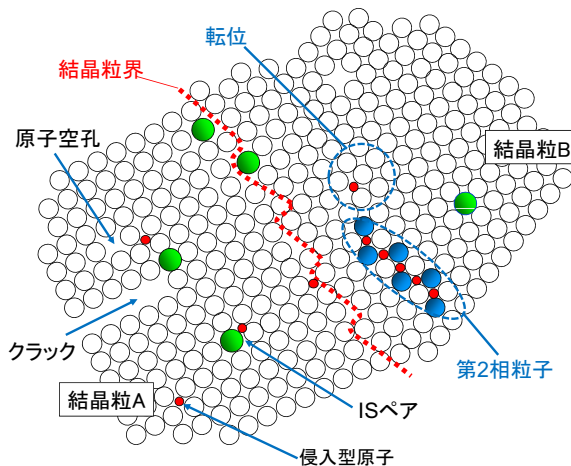
①割れに対する安全性判定  
 $[H] < [H]_{cr}$   
 ②粒界水素を低減する組織提案

# 1. 背景

公開

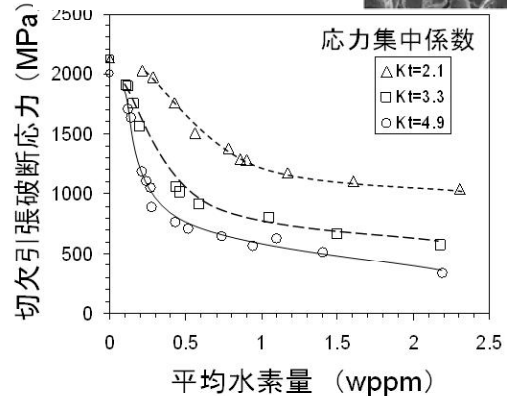
## 中間目標達成のための具体的研究項目(委託研究)

### (1)水素の存在状態と拡散移動



### (2)水素による破壊現象

1300MPa級 SCM435鋼の研究例

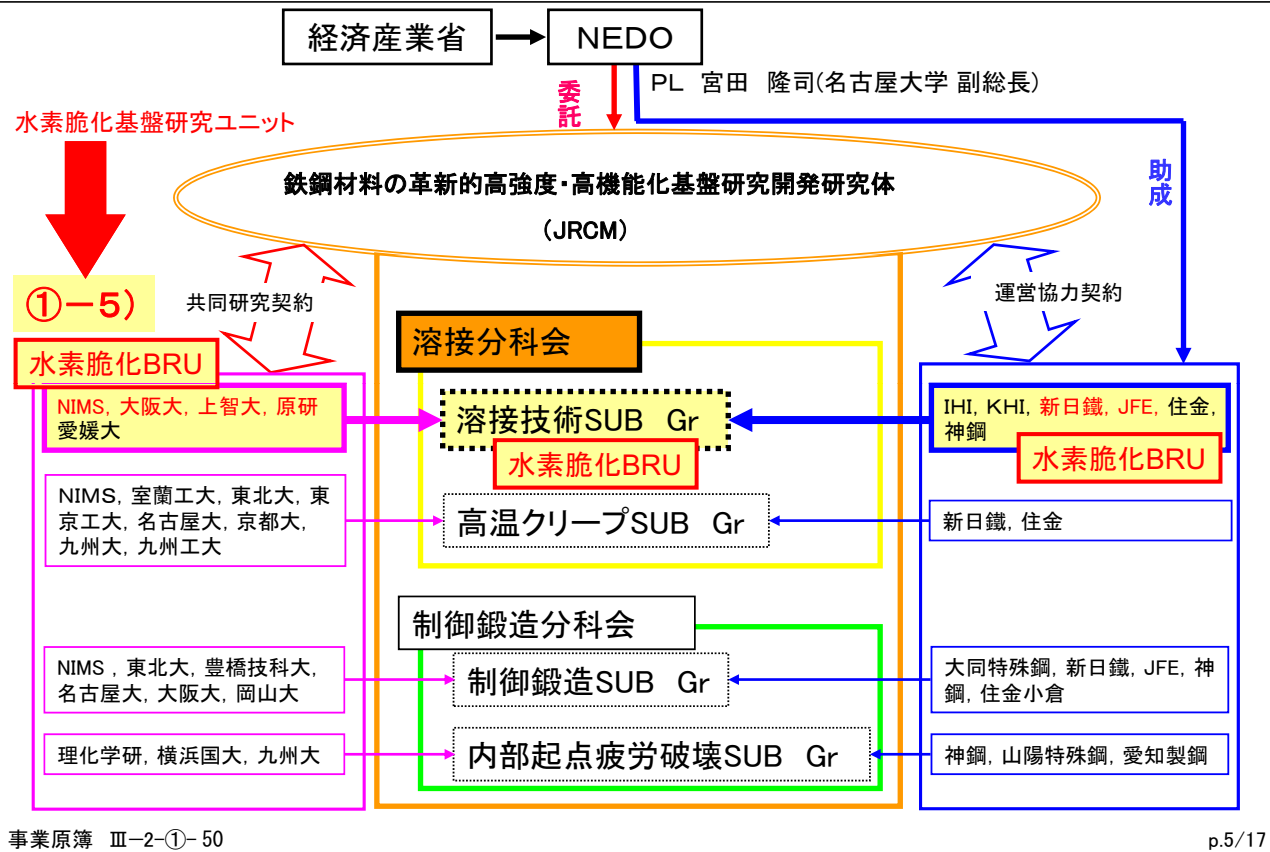


- 空孔、転位、粒界、表面と水素との相互作用エネルギーEbの定量化
- 各種格子欠陥での水素拡散の定量化

- 1000MPa級鋼での破断応力の取得
- 水素による粒界強度低下の定量化
- 応力下での水素拡散集積の定量化

## 2. 研究開発の実施体制

公開



## 3. 開発目標と達成状況

公開

論文: 2件

研究開発項目	中間目標	最終目標	主な成果	達成状況	最終目標に向けた今後の取組み
①-5) 溶接部水素侵入による低温割れ機構の研究	<p>1) 単一の格子欠陥(空孔、転位、粒界等)を含む単純化された金属組織における格子欠陥と水素の相互作用エネルギーの定量化 【水素の存在状態と拡散移動】</p> <p>2) メゾスケール(結晶粒数個~数十個レベル)での応力状態における水素の挙動解析技術の基盤構築【水素による破壊現象】</p>	<p>複数の格子欠陥が重畳する複雑金属組織での各種格子欠陥における水素存在状態の定量化。メゾスケールでの水素の影響による亀裂の進展モデル構築。</p> <p>単純化した金属組織を持つ1000MPa高強度鋼での局所応力-局所水素量に基づく破断限界の取得。</p>	<p>1)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>鉄中の空孔、転位、粒界、表面と水素の相互作用エネルギー(Eb)を第一原理計算と分子動力学法により定量的に決定。(世界初の成果、空孔&gt;転位芯&gt;粒界を明示)</li> <li>各種格子欠陥のEbを実験的に求める基盤構築を達成。(世界唯一の低温昇温脱離分析装置の開発に成功)</li> </ul> <p>2)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1000MPa級鋼の破断応力を水素量4ppmまで実験的に取得。(応力と水素量の危険域を明示)</li> <li>水素粒界割れによる破断応力の低下を第一原理計算に基づき定量評価。(世界初の成果)</li> </ul>	<p>◎</p> <p>○</p>	<p>1) 残留オーステナイトを含む鋼での水素存在状態の定量化。(溶接SGとの統合により明確された課題。プロジェクト全体目標にとって重要課題としてH21年度中に着手)</p> <p>2) これまでに達成した世界唯一の実験装置や世界初の解析コードを用いて2次元から3次元モデルへ、単一欠陥から複数欠陥重畳組織への取り組みを行い最終目標を達成見込み。</p>

事業原簿 Ⅲ-2-①-5 p.5/17



# 4-1. 水素の存在状態と拡散移動

公開

**フェーズフィールドモデル(メソスケール)の構築**

**転位と水素の相互作用 (阪大, 原子力機構)**

ミスフィット(結晶すべり)エネルギー  
【第一原理計算】

水素なし → 水素あり ( $c = 0.25$ )

転位周囲の水素トラップエネルギー  
【第一原理計算・分子動力学計算】

刃状転位      らせん転位

**空孔と水素の相互作用 (NIMS)**

空孔の水素トラップエネルギー  
【第一原理計算】

H-1      H-2      H-3      2A

**水素が弾性特性に与える影響 (阪大)**

弾性定数の水素濃度依存性  
【分子動力学計算】

弾性定数(Fe) [GPa]

モル分率 [mol<sub>H</sub>/mol<sub>Fe</sub>]

$C_{11}$   
 $C_{12}$   
 $C_{44}$

欠陥場(転位, 表面, 粒界, 固溶炭素)

**フェーズフィールドモデル (メソスケールモデル)**

水素濃度場 ↔ 弾性応力場

**水素と粒界・表面の相互作用 (原子力機構)**

粒界・表面の水素トラップエネルギー  
【第一原理計算】

析出エネルギー

表面      粒界

粒界      表面

位置 in c axis      x=0.0

**欠陥と水素のダイナミクス (応力下での挙動)の獲得**

動的特性

転位形状      水素濃度分布

**欠陥付近での水素拡散挙動 (阪大)**

バルク中拡散 >> 欠陥近傍拡散

マクロモデル(原子力機構)への連結

実験(上智大)との比較

事業原簿 Ⅲ-2-①- 52 p.7/17

# 水素の存在状態(粒界・表面)

公開

**水素と粒界・表面の相互作用**

**BCC Fe $\Sigma$ 3(111) 粒界**

鉄原子 76個

c軸 <111>  
a軸 <1-10>      b軸 <11-2>

粒界 c

BCCFe $\Sigma$ 3(111)GB	BCCFe $\Sigma$ 3(112)	$\Sigma$ 9(114)	$\Sigma$ 9(221)	$\Sigma$ 11(113)	$\Sigma$ 11(332)
$\gamma_{gb} = 1.52 \text{ J/m}^2$	$\gamma_{gb} = 0.45 \text{ J/m}^2$	1.44	1.60	1.40	1.42

電子密度の低い領域

粒界空孔site(0)

格子間site(1o): bccFe中でoサイトだったサイト

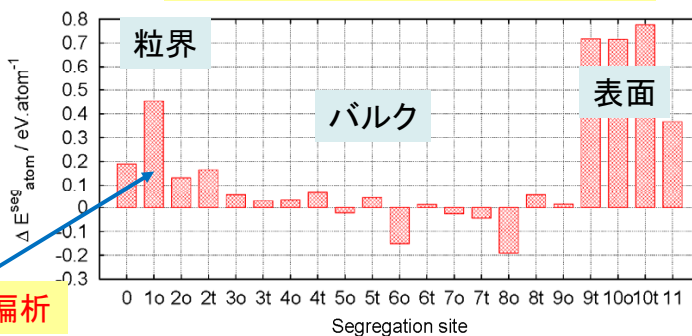
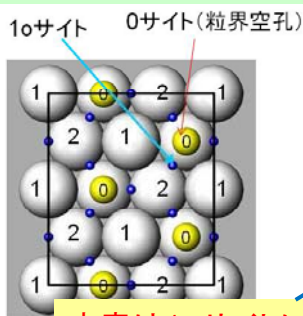
Fe site(1)

Fe site(2): dumbbell site

事業原簿 Ⅲ-2-①- 53 p.8/17

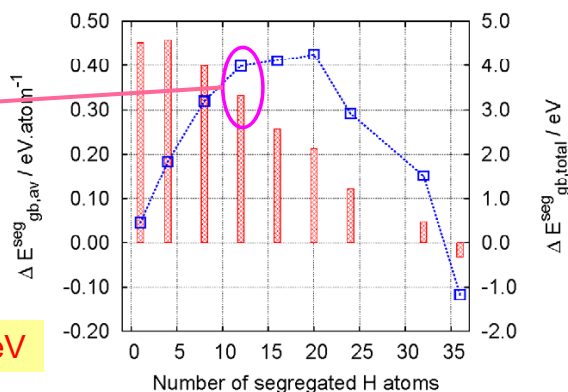
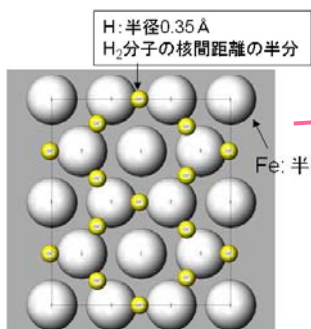
## 水素と粒界・表面の相互作用

粒界:0.45eV, 表面:0.78eV



水素は1oサイトに偏析

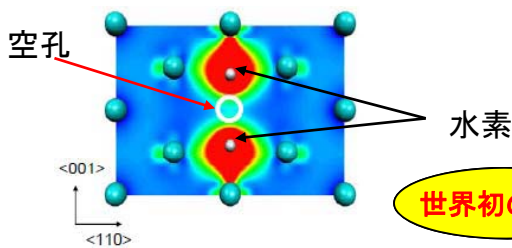
BCC Fe $\Sigma$ 3(111)GB



12個の1oサイトまで偏析可能:0.33eV

## 水素と空孔の相互作用

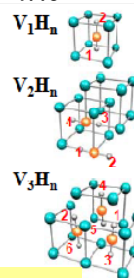
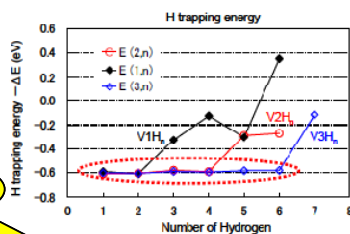
### V-H2複合体の電子状態



世界初の成果

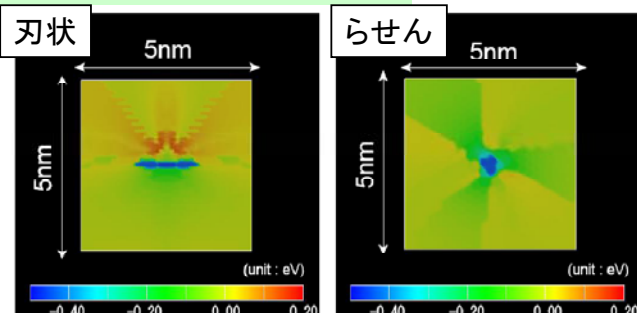
鉄中で水素分子として存在しない

	Fe16	Fe54	Fe128	Fe250
原子空孔	2.23	2.20	2.19	2.23
原子空孔とH2複合体	1.36	1.32	1.40	1.39



単空孔~3空孔:Eb=0.6eV

## 水素と転位の相互作用



水素:すべり面に広がる

原子埋め込み法ポテンシャルを用いた  
分子動力学法の解析コードの開発

Fe原子数 12,192個~13,824個

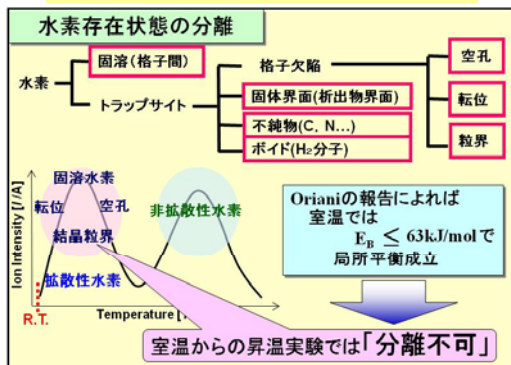
刃状転位 : 0.46eV  
らせん転位 : 0.45eV

静水圧応力場の存在しない  
らせん転位も芯では水素をトラップ

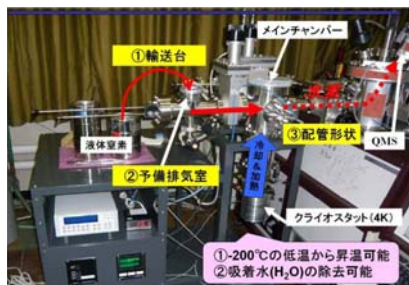


## ■ 低温昇温脱離分析装置の開発

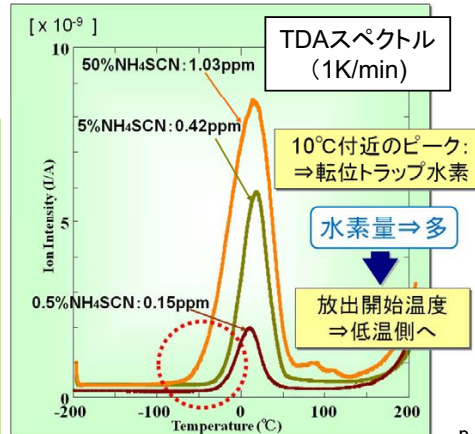
$E_b$ (粒界、転位、空孔) < 0.65eV



-200°Cからの水素分析が可能  
(世界唯一の装置開発に成功)



90%冷延純鉄+200°C2h(転位)

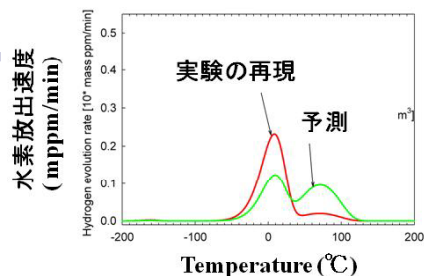


## ■ 水素熱脱離プロファイルの解析技術の開発

第一原理計算の結果  
を取り入れた水素放出  
数値モデルの直接  
シミュレーション

粒界と転位のピーク  
分離可能を予測

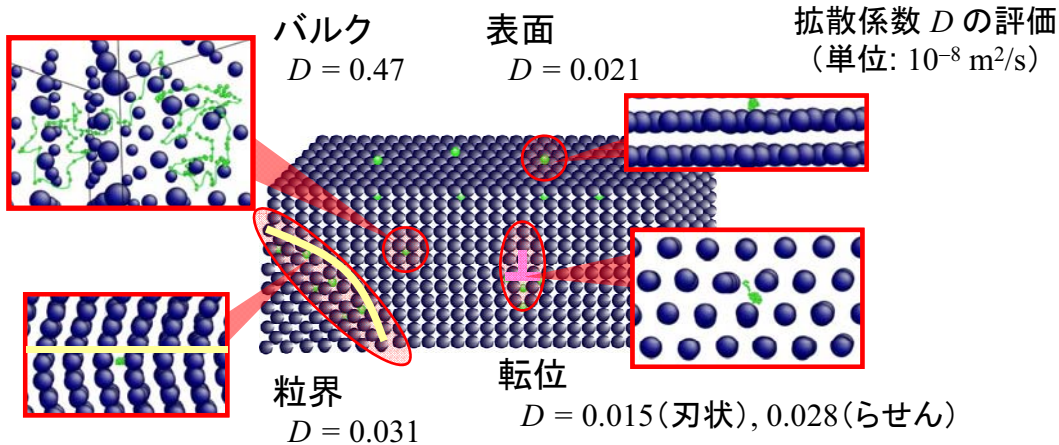
事業原簿 Ⅲ-2-①-58, 59



## ■ 水素拡散速度の分子動力学解析(300 K)

中間目標を超える成果!

転位近傍, 粒界近傍, 表面近傍での異方性水素拡散速度を評価



水素拡散速度の大小関係:

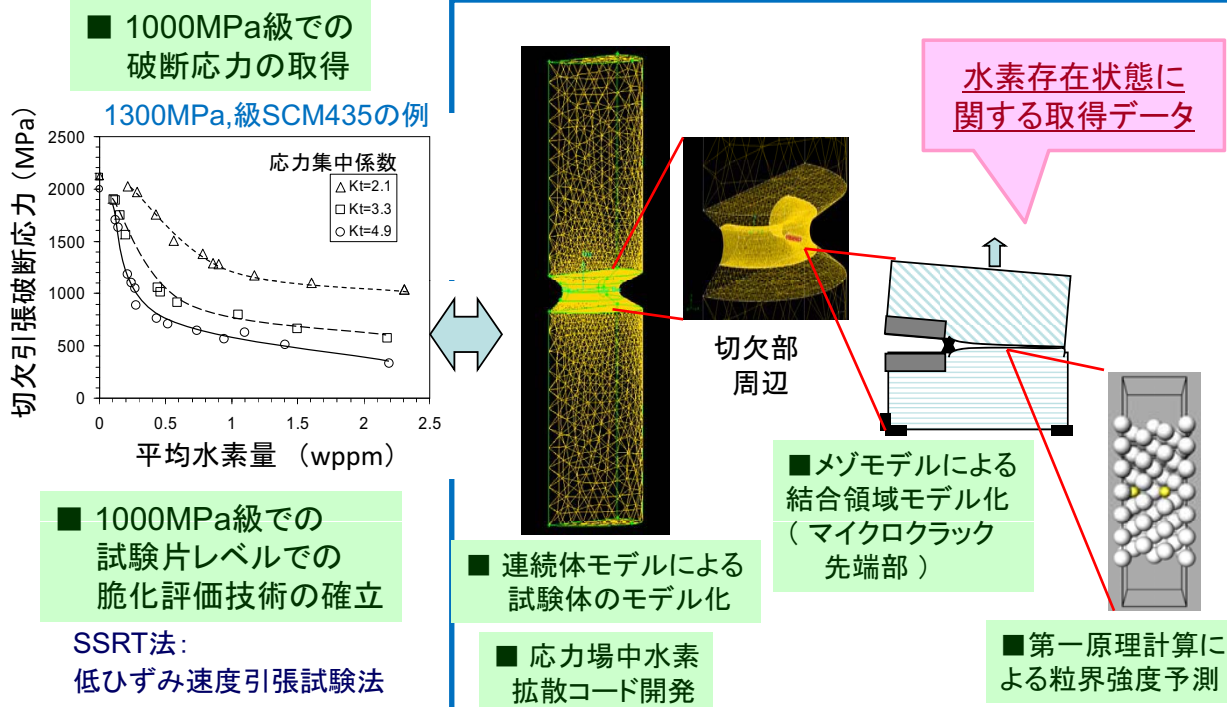
バルク ≫ 転位 ≃ 粒界 ≃ 表面  
(約1/25)

バルク領域を含め、欠陥近傍においても、  
水素拡散速度の明確な異方性は見られない

欠陥近傍での水素拡散速度を定量的に評価

パイプ拡散は見られない!

### 粒界割れ破断応力予測のための階層的モデル化

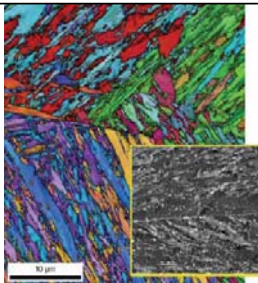


### 1000MPa級鋼での破断応力-水素量関係の取得(実験)

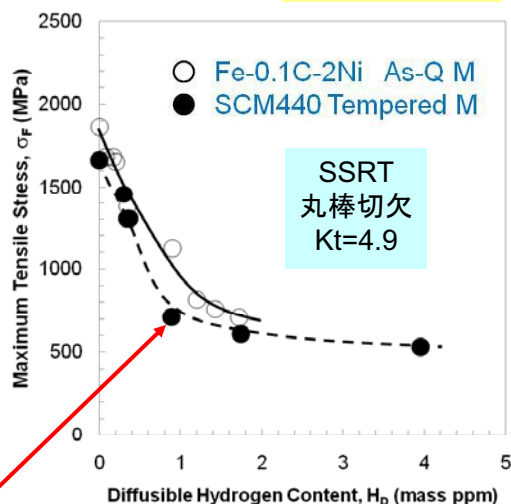
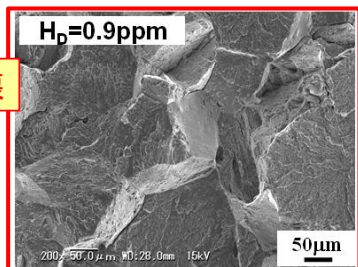
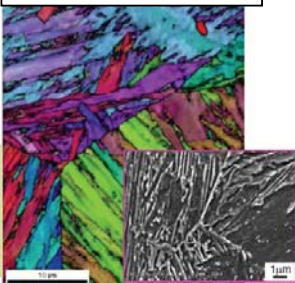
応力と水素量の危険域を明示

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	B
Boron steel	0.20	0.06	1.00	0.018	0.008	--	--	--	0.002
SCM440	0.40	0.28	0.82	0.015	0.016	1.08	0.18	0.02	--
Fe-0.1C-2Ni	0.09	0.01	<0.01	0.002	0.001	--	--	1.97	--

SCM440 Tempered M



Fe-0.1C-2Ni As-Q M



- ・粒界破壊によって著しく脆化
- ・破断応力は1/3-1/4に低下
- ・2ppm以上で一定値

➡ 計算解析の基礎データとして活用

# 水素による破壊現象

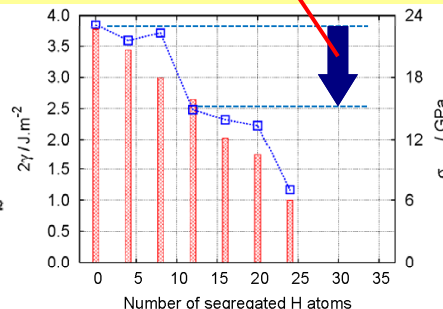
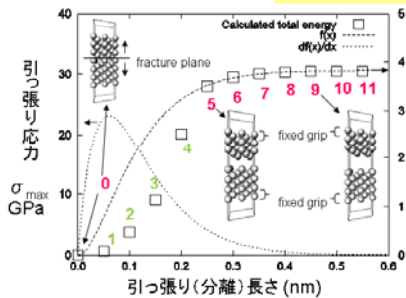
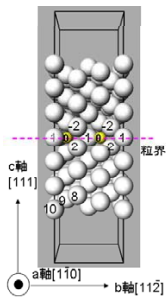
公開

## ■ 水素による粒界強度低下の定量化(第一原理計算)

第一原理計算結果に基づく粒界強度の定量化に成功(世界初)

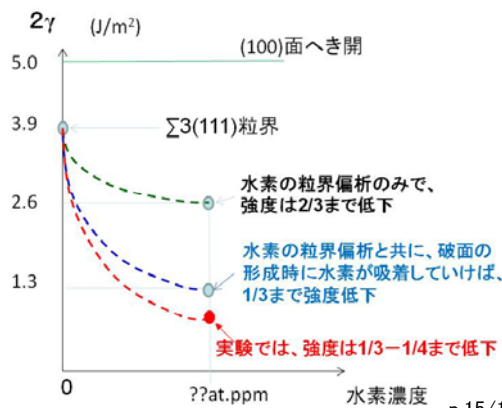
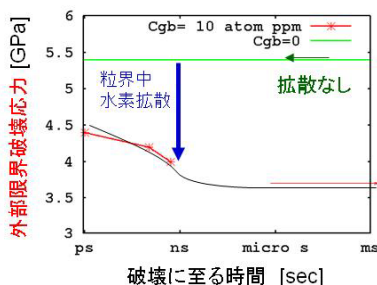
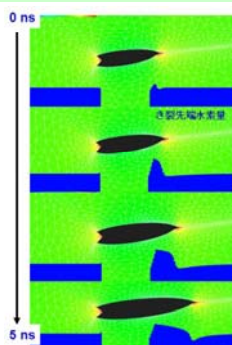
BCC Fe $\Sigma$ 3(111)GB

水素の粒界偏析だけで粒界強度は2/3まで低下



## ■ 2次元結合領域メソモデル(亀裂進展)の開発

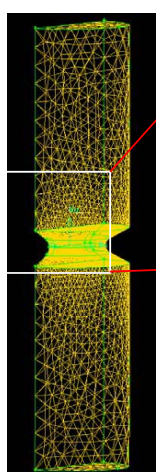
粒界中水素拡散で強度低下



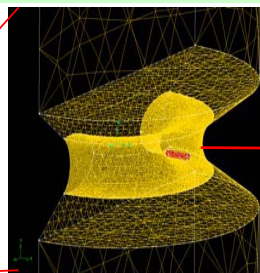
# 水素による破壊現象

公開

## ■ 3次元応力場計算コード&3次元応力場中水素拡散計算コードの整備開発

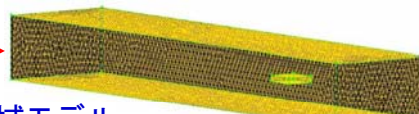


全体領域モデル



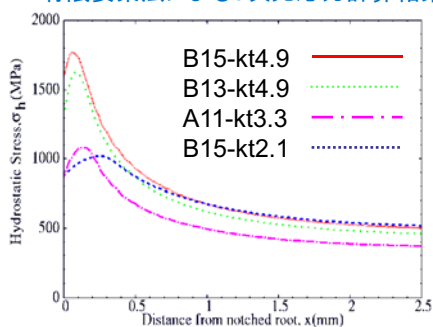
部分領域モデル

弾塑性モデルによる応力計算

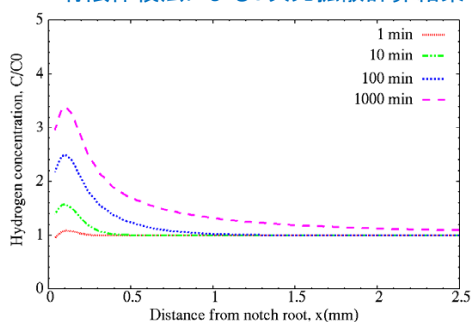


- ・異方性弾性論による多結晶体
- ・応力集中のメカニズム

切り欠き底面の静水圧応力分布  
有限要素法による3次元応力計算結果



切り欠き底の面の水素分布 (Kt4.9-B15)  
有限体積法による3次元拡散計算結果





## 5. まとめと最終目標に向けた今後の取組み

### ●中間目標1)の達成状況 (超過達成 ◎)

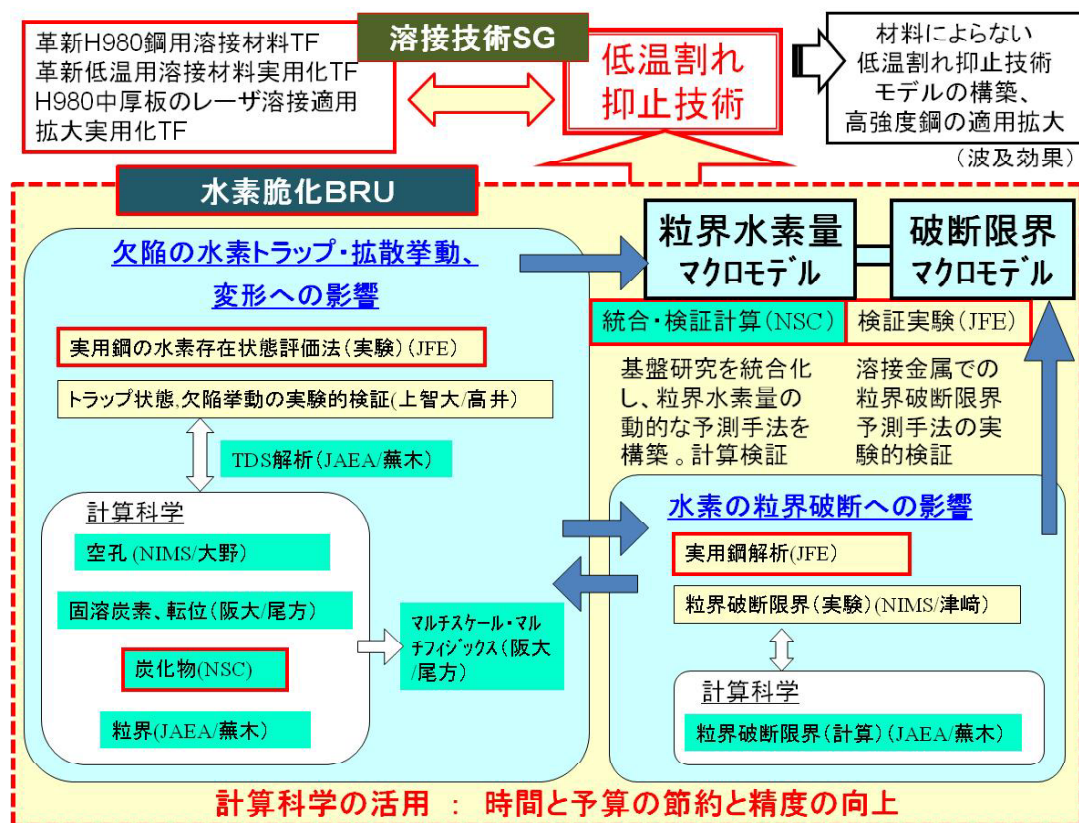
1. 鉄中の空孔、転位、粒界、表面と水素の相互作用エネルギー  $E_b$ を第一原理計算と分子動力学法による定量値取得を達成。(世界初の成果、空孔>転位芯>粒界を明示)
2. 各種格子欠陥の $E_b$ を実験的に求める基盤構築を達成(世界唯一の低温昇温脱離装置の開発に成功)
  - 助成研究が行う粒界水素量マスターカーブ構築のための基礎データと基礎技術を取得。例えば空孔と転位芯は粒界水素量を低下させる有効なトラップサイトであることを定量的に提示できた。

### ●中間目標2)の達成状況 (達成 ○)

3. 1000MPa級鋼の破断応力を水素量4ppmまで実験的取得を達成(溶接金属モデル組織を対象とした応力と水素量の危険域を明示)
4. 水素粒界割れによる破断応力の低下を第一原理計算に基づく定量的な評価を達成 (世界初の成果、水素の偏析により粒界強度が1/3まで低下することを明示)
  - 助成研究が行う破断限界マスターカーブ構築のための基礎データと基礎技術を取得。例えば、粒界偏析量が飽和する高水素濃度域では破断応力が一定値になることを実験計算で示した。

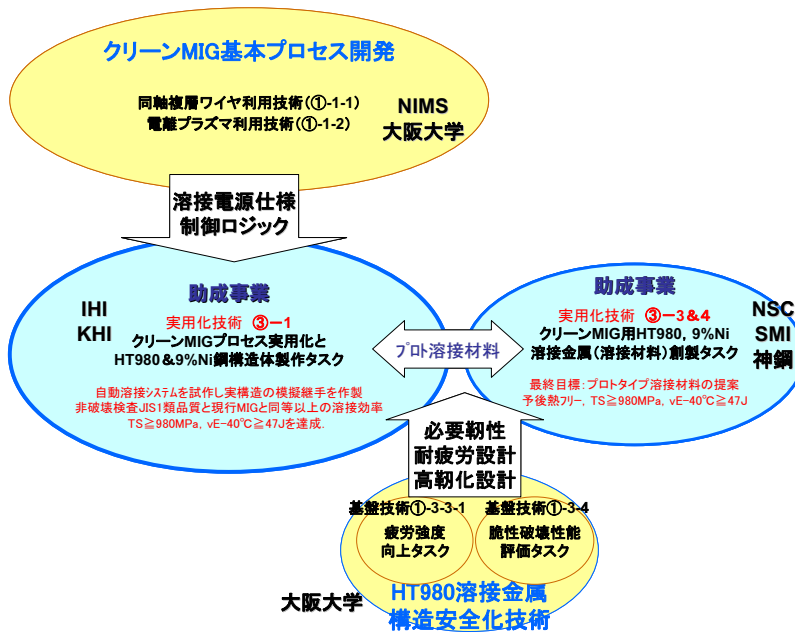
### ●最終目標に向けた今後の課題(取組み)

1. 残留オーステナイトを含む鋼での水素存在状態の定量化。(溶接SGとの統合により明確された課題。プロジェクト全体目標にとって重要課題としてH21年度中に着手する)
2. これまでに達成した世界唯一の実験装置や世界初の解析コードを用いて、2次元から3次元モデルへ、単一欠陥から複数格子欠陥重畳組織への取組みを行うことによって最終目標を達成できる見込みである。





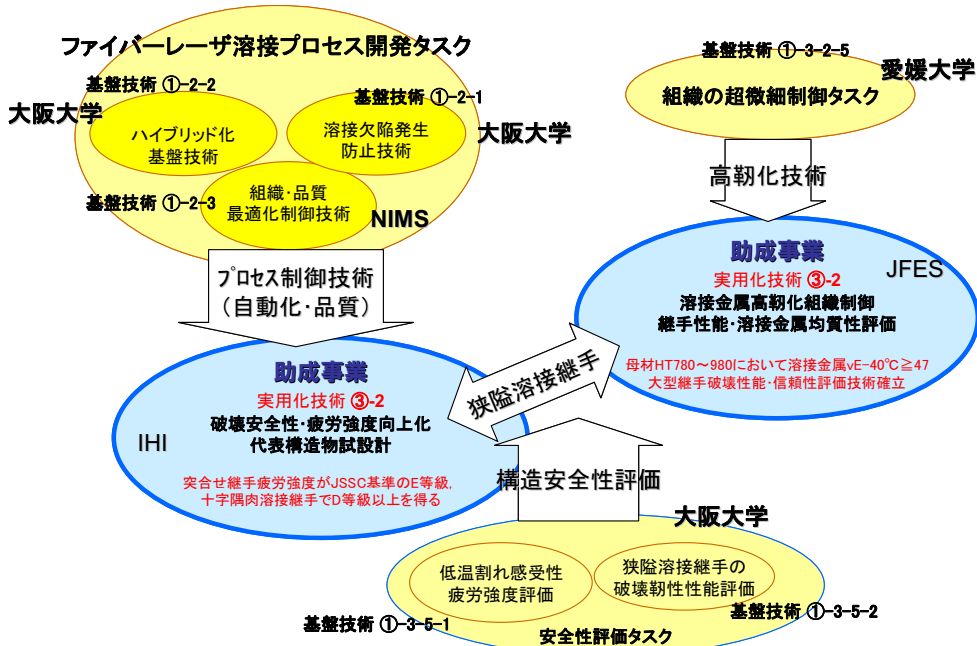
### クリーンMIG溶接実用化技術創生



プロジェクト詳細説明(公開)

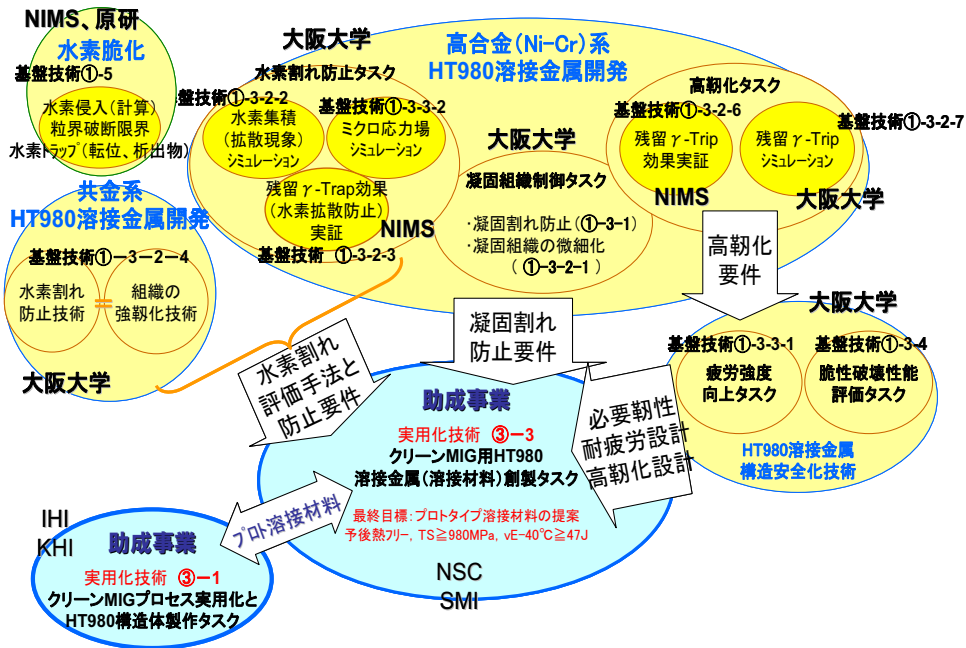
溶接SG(委託) ①-5)

### HT980中厚鋼板のファイバーレーザ溶接実用化技術創生

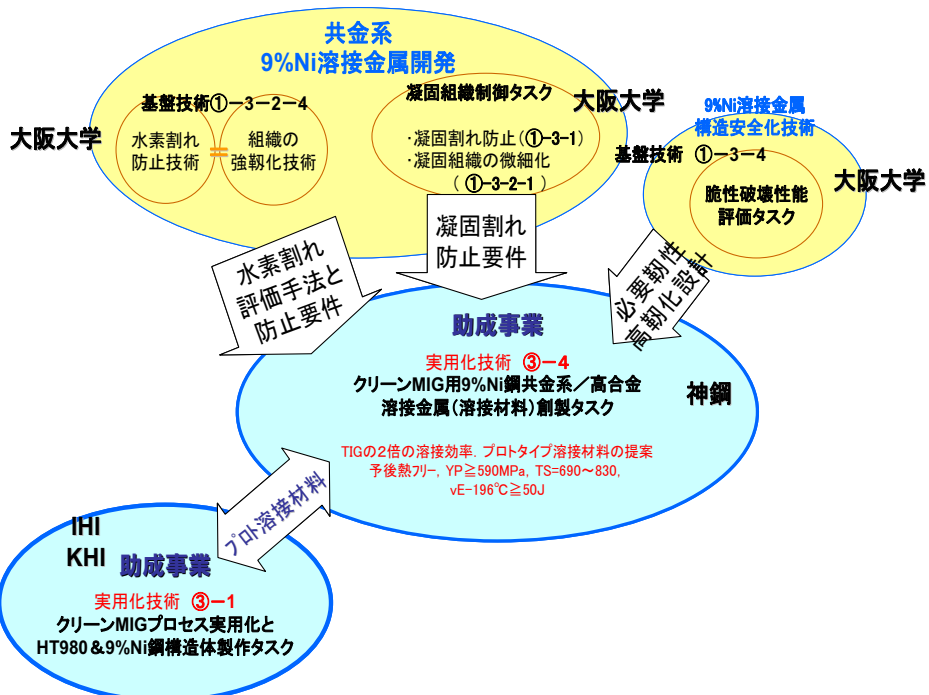


### 実用クリーンMIG用HT980溶接金属創生

#### 水素脆化BRU



### 実用クリーンMIG用9%Ni溶接金属創生



# 「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

プロジェクト詳細説明(公開)  
高温クリープSG(委託) ①-4)

## 内容

公開

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

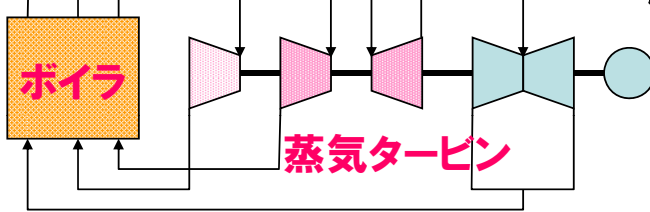
## 石炭火力の高効率化はわが国喫緊の課題

高温部に多量のNi基合金を使用

⇒ 経済性の問題

35MPa, 700°C

750°C 750°C



A-USC: 700°C 超級の次世代  
超々臨界圧プラント  
(Advanced-Ultra Super Critical)

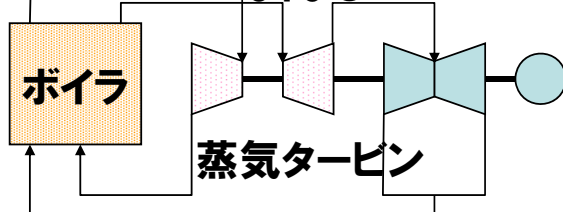
送電端熱効率46~48%(HHV)

CO<sub>2</sub>削減: 約10%

原油削減換算: 380万kL/年

25MPa, 600°C

610°C



高温高圧化

USC(従来型): 600°C級  
送電端熱効率 42%(HHV)

出典: A-USC実用化の会

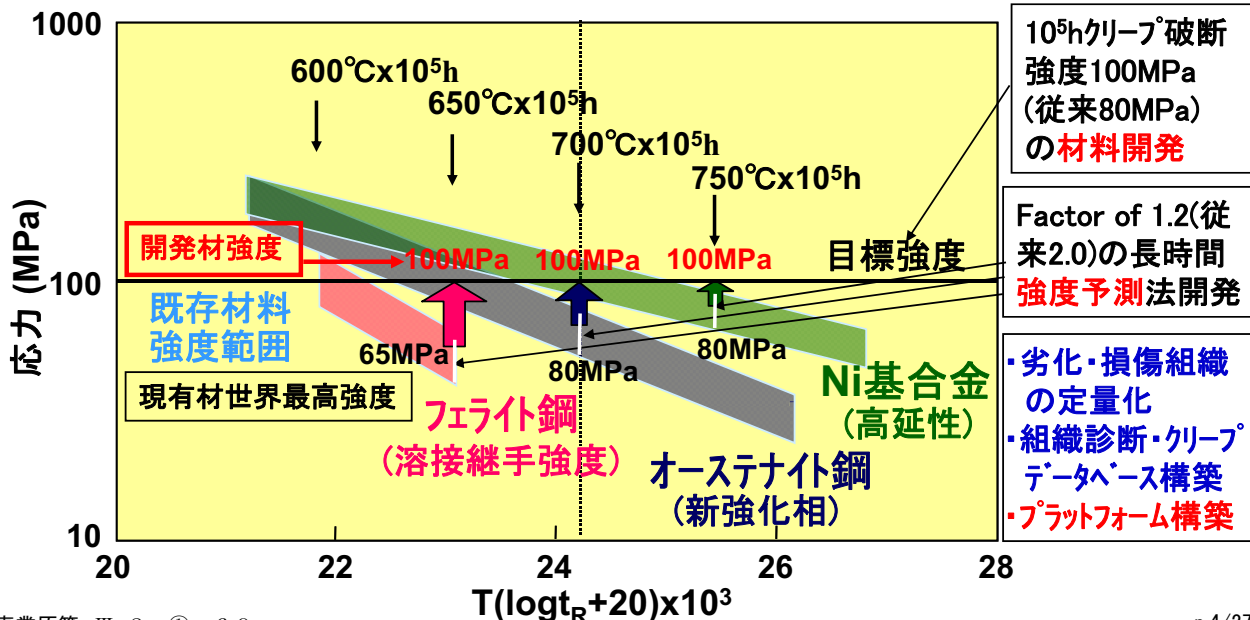
# 1. 背景

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

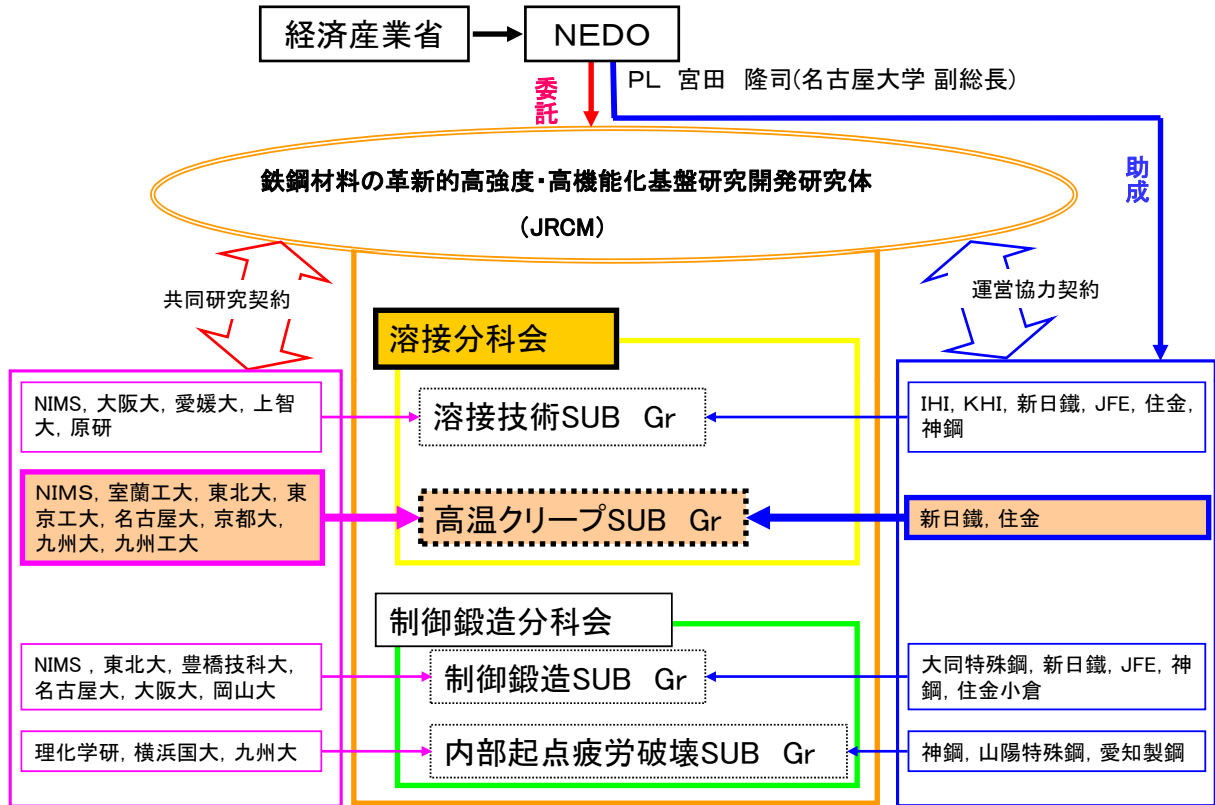
○ 高精度長時間強度予測技術の開発が必須





## 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"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>	<p><b>中間目標を達成目処</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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"> <li>(1) 650°C用フェライト系耐熱鋼、高B低N鋼を提案</li> <li>(2) 700°C用オーステナイト系鋼、金属間化合物粒析出強化鋼を提案 (18Cr-30Ni-3Nb鋼)</li> </ul> </li> <li>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"> <li>(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)</li> <li>(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</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎</li> <li>○</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>

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懸念され、来年度早期での挽回も困難。

## 4. 検討内容

公開

### (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)

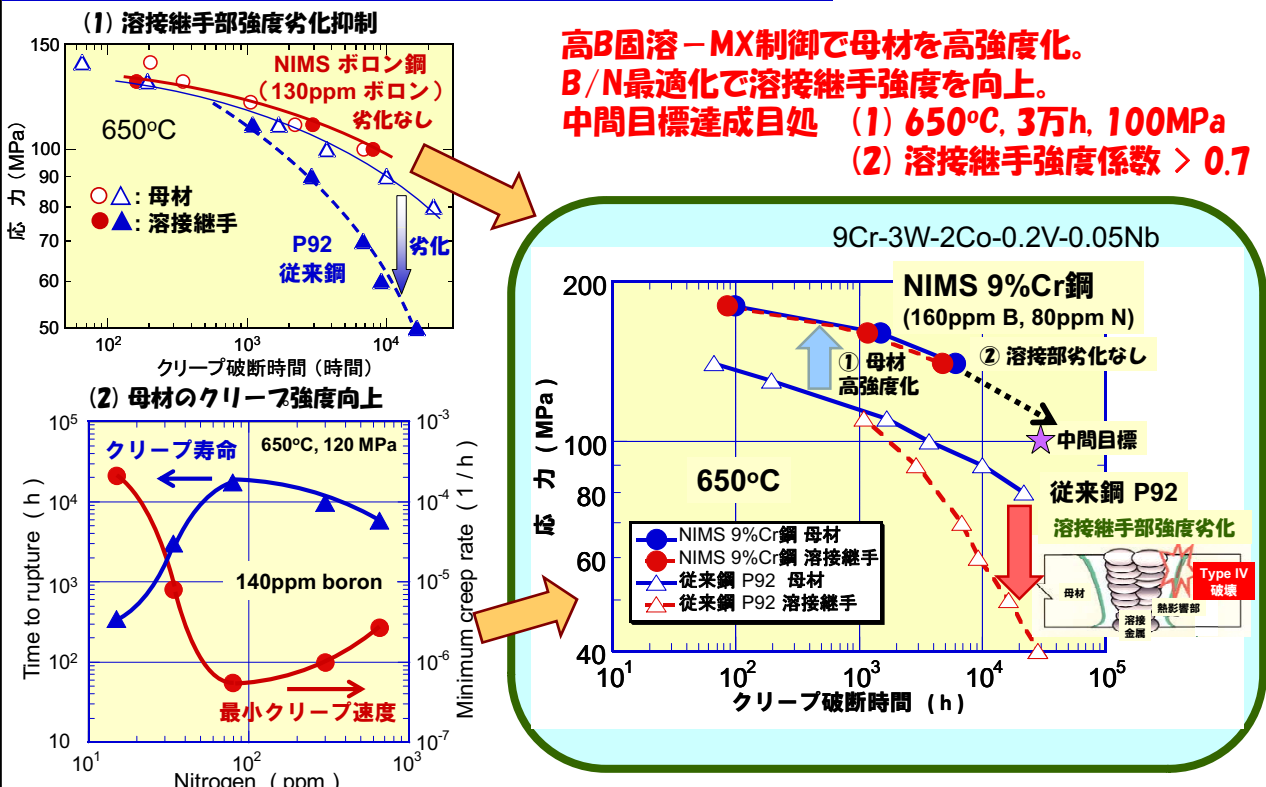
- 650°C用フェライト系耐熱鋼  
(溶接継手強度係数 > 0.7)
- 700°C用オーステナイト系耐熱鋼

p.7/27

## 4. 検討内容

公開

### フェライト鋼の組織劣化と長時間強度低下機構の解明



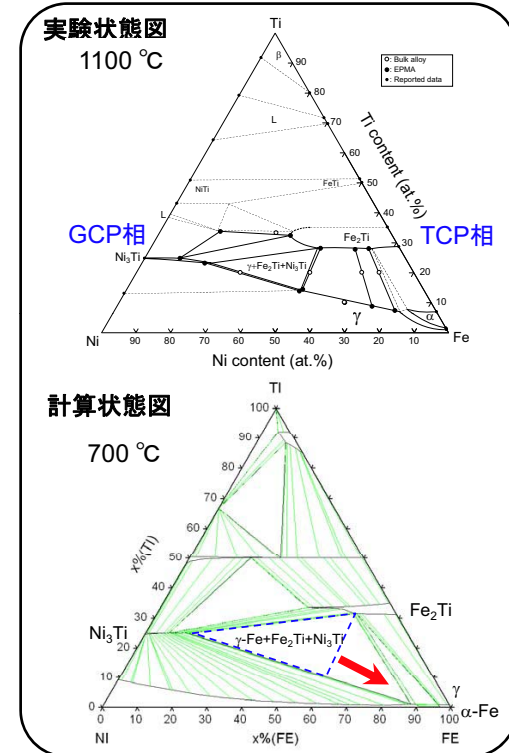
p.8/27

# 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)

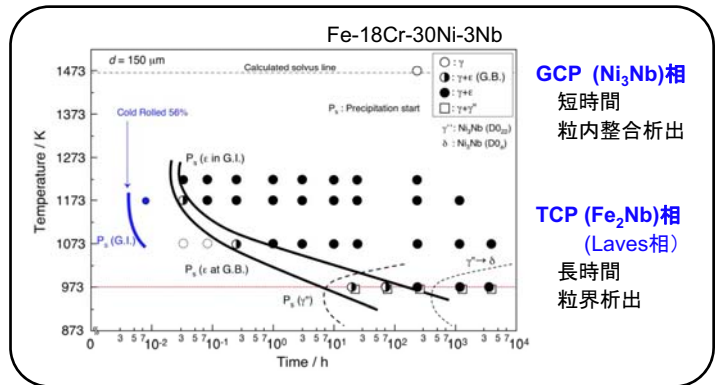


オーステナイトは700℃において  
二種類の金属間化合物相と平衡  
TCP相とGCP相

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)

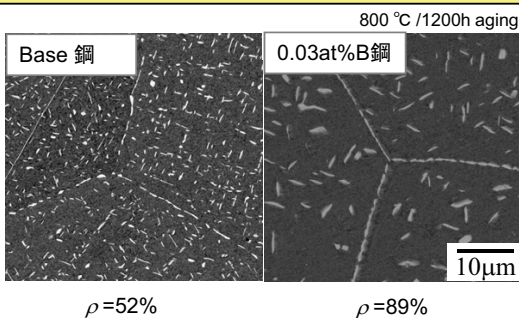


# 4. 検討内容

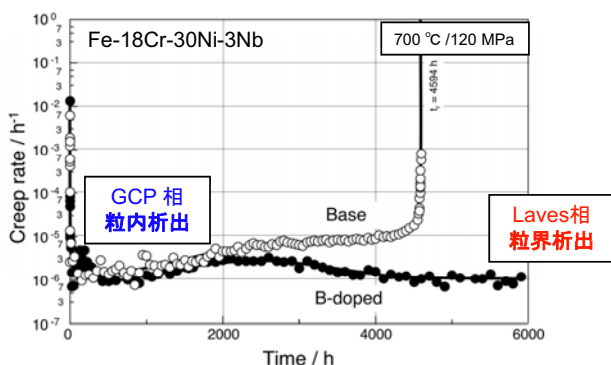
公開

## オーステナイト系耐熱鋼の析出制御と設計指針の提示

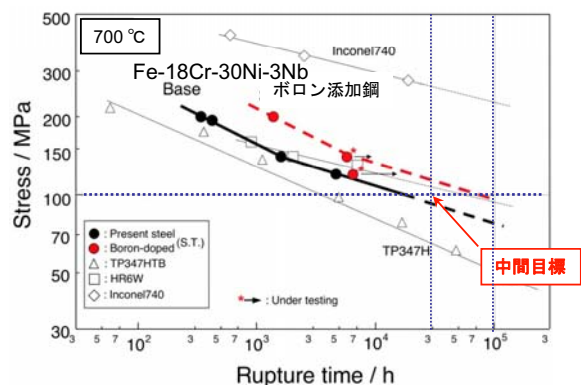
### ボロンの添加により粒界被覆率増大



### 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指**  
**100 MPa @700 °C 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 °C 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

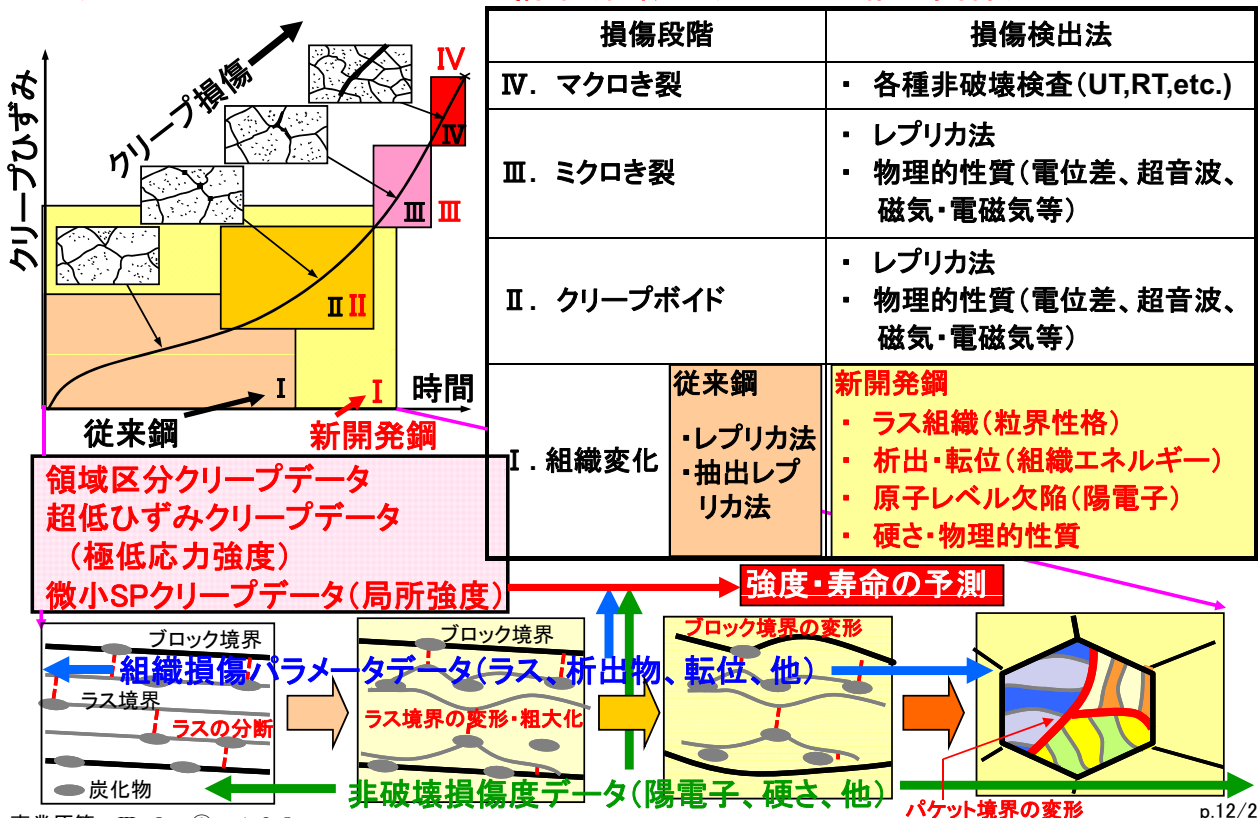
(2) - 1 組織パラメータによるクリープ劣化度の測定、組合わせ適用による高精度化

(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

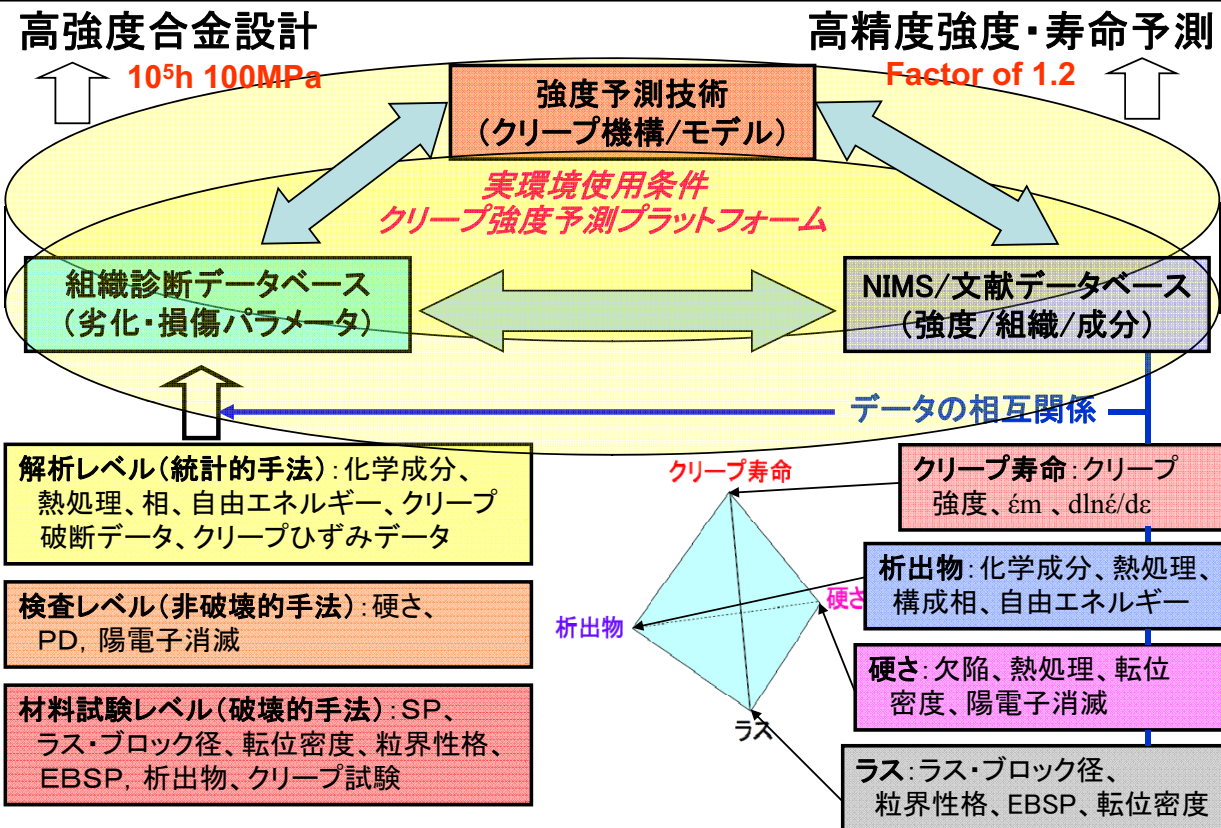
## プラットフォームデータベースの構築(組織パラメータの相互関係)





## 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

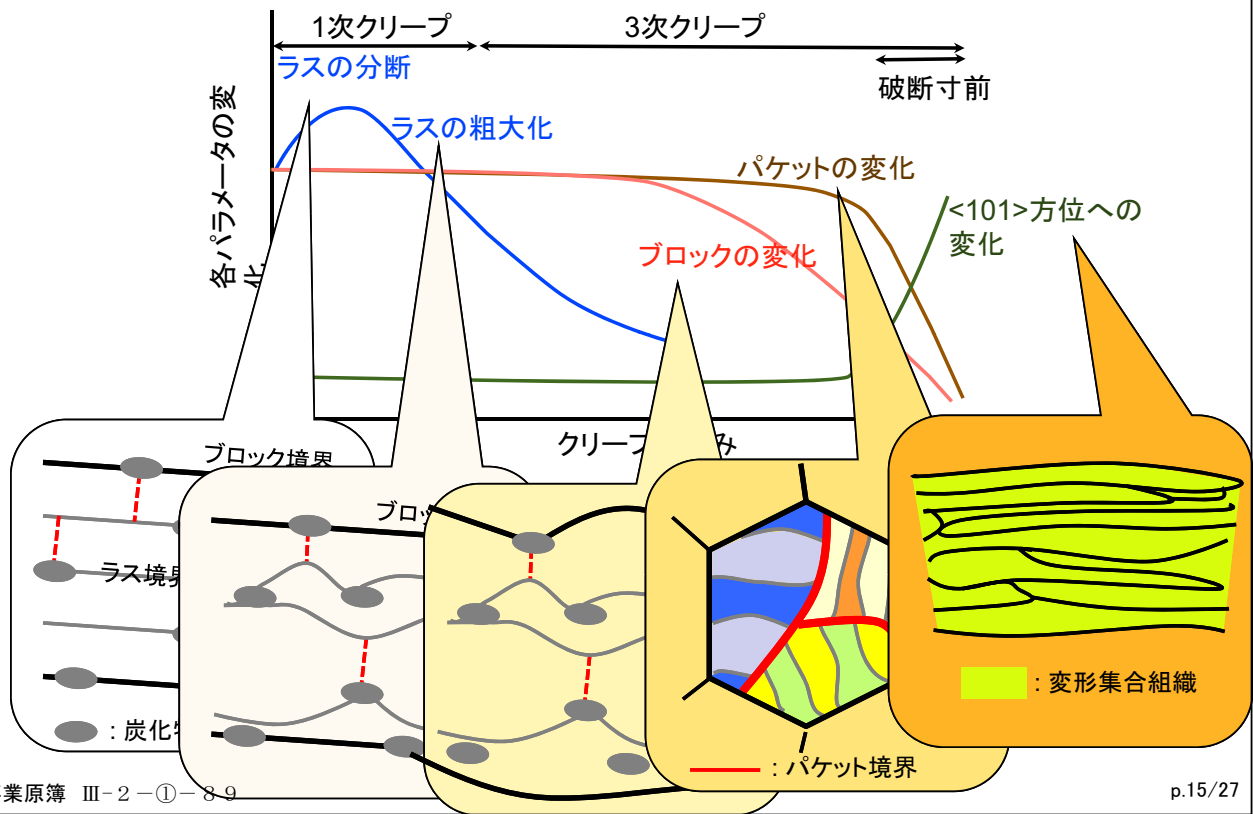
組織パラメータによるクリープ劣化度の測定、組合わせ適用による高精度化

- 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

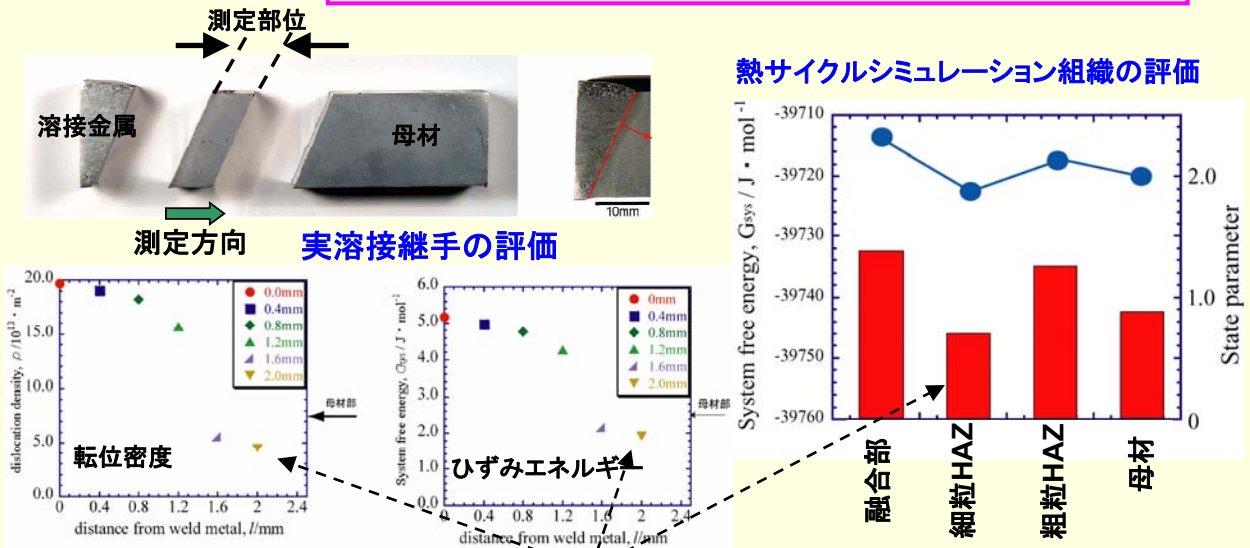
領域	1次クリープ～ 3次クリープ前半	3次クリープ後半	破断寸前
診断パラメータ	微小方位差 (1~2°)	大角粒界における方位差	結晶方位変化
組織劣化の要因	ラス境界の変化	ブロック境界の変化	塑性変形による集合組織形成
評価例	<p>Lath boundary length per unit area/mm<sup>2</sup></p> <p>Creep strain/%</p>	<p>Correlation coefficient</p> <p>Reduction of area / %</p>	<p>Area fraction of &lt;011&gt; // LD grain / %</p> <p>Reduction of area / %</p>

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



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  $P$

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

組織劣化とともに  $P$  は低下

# 4. 検討内容

公開

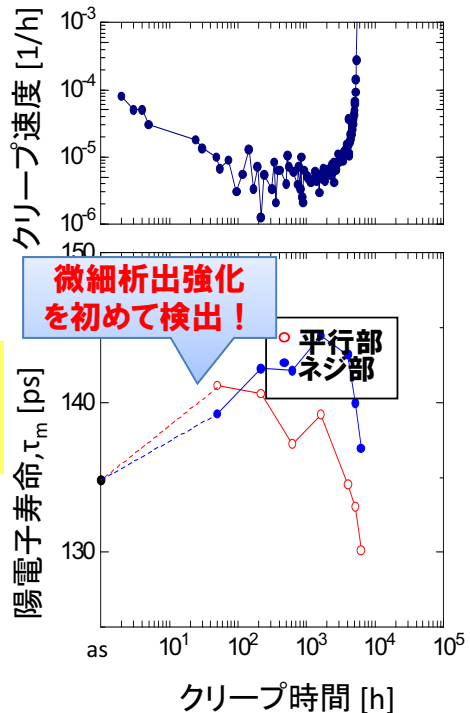
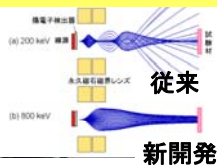
## 陽電子消滅寿命計測手法の高精度化・高度化

### 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

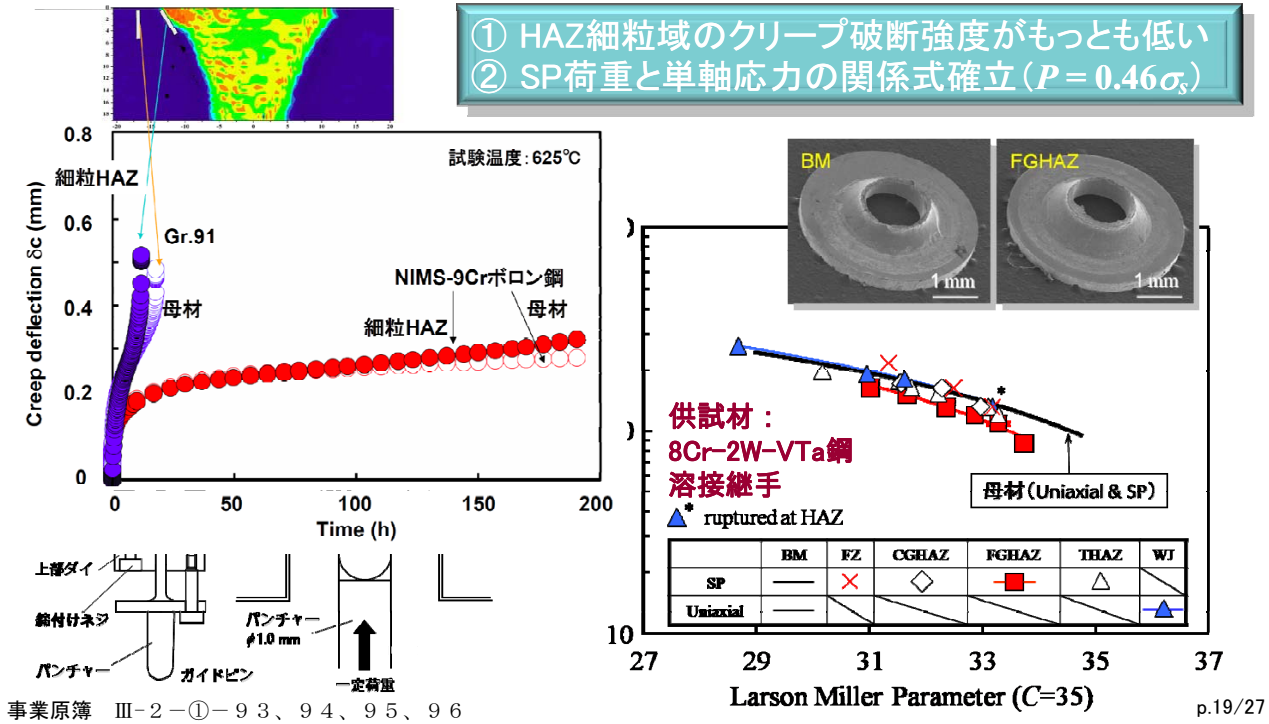
→ 新耐熱材料設計、予寿命予測に活用

# 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)

- ① HAZ細粒域のクリープ破断強度がもっとも低い
- ② SP荷重と単軸応力の関係式確立 ( $P = 0.46\sigma_s$ )



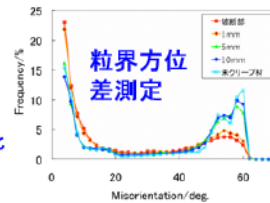
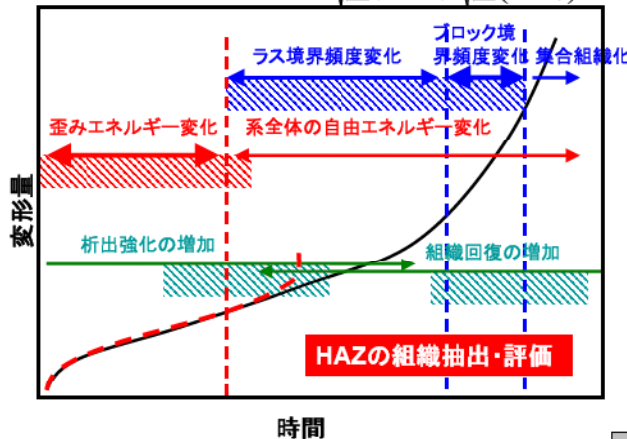
# 4. 検討内容

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

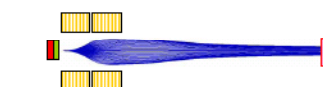
### 組織パラメータ因子を用いた強度予測技術確立

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



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

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、 $\gamma$ 系耐熱鋼、Ni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

パンチヤー  $\phi 1.0$  mm

一定荷重



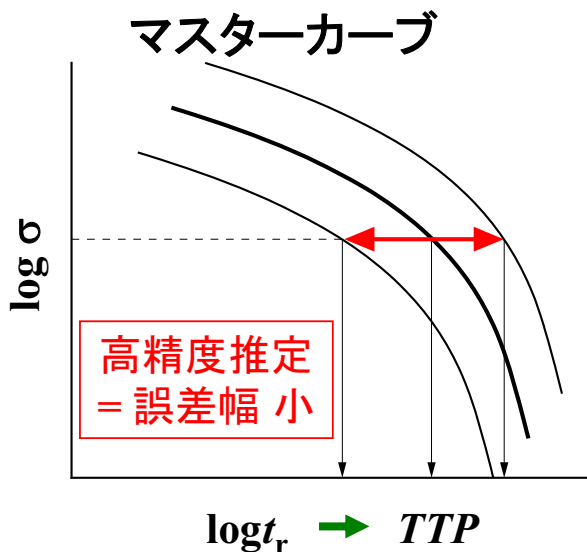
## (2) 長時間強度予測技術の開発-2/2

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

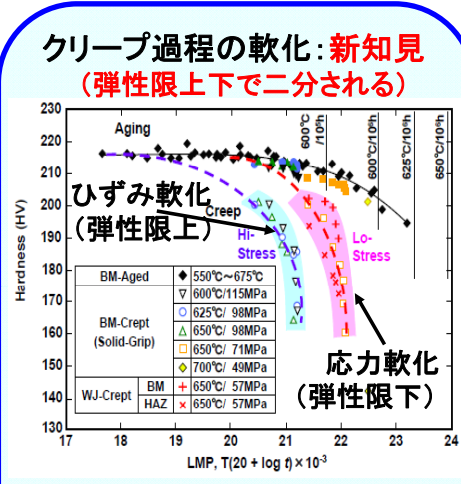
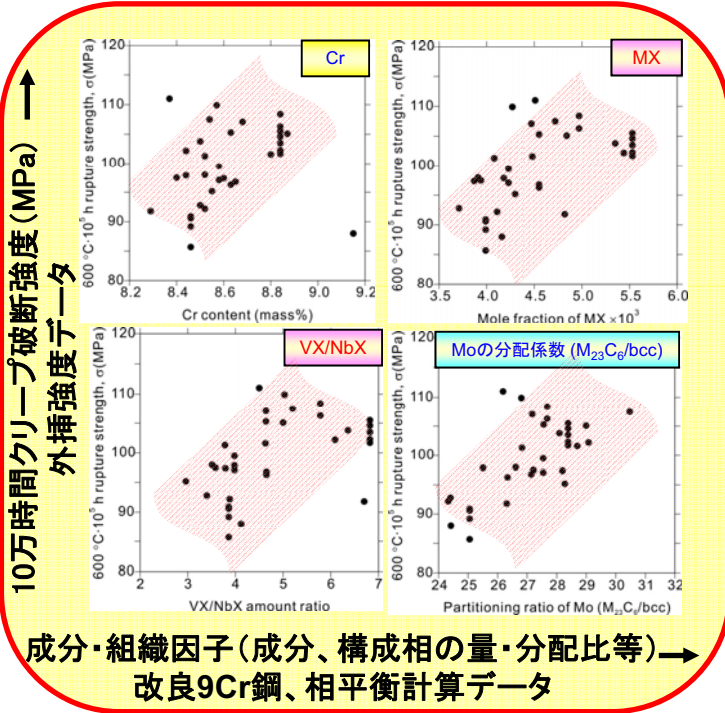
→ TTPの不完全さとヒート間差を除いて、精度x1.2を達成

# 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



クリープ過程の軟化: 新発見  
(弾性限上下で二分される)

硬さによる寿命比 ( $t/t_R$ ) 予測式の開発

$$t/t_R = 1/0.15(0.98 - H/H_0)$$

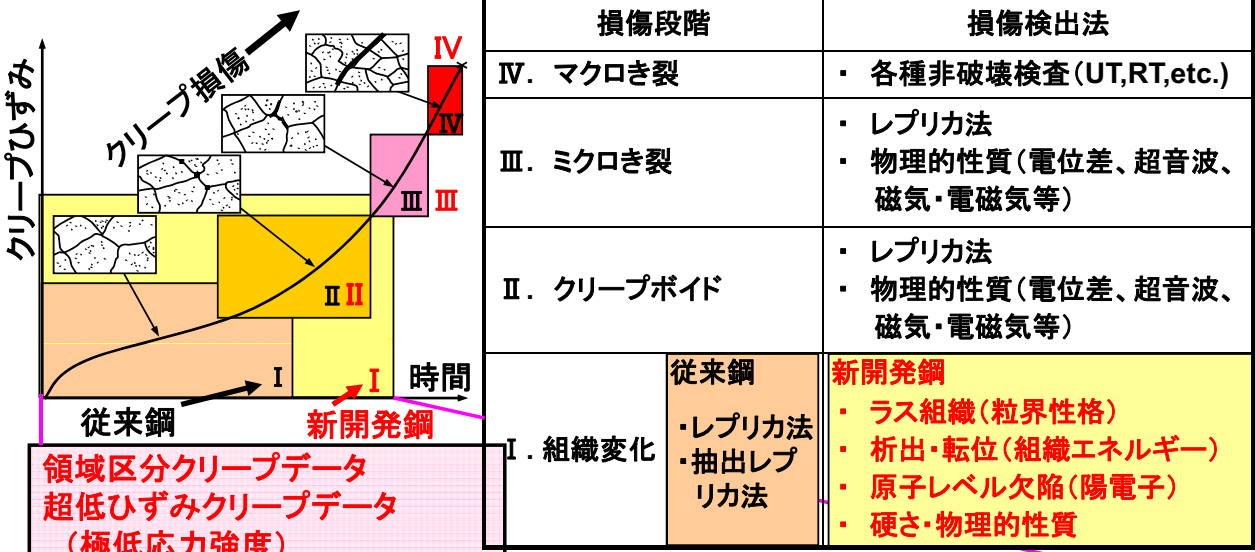
$$= 1/0.15\{0.98 - H/\{H + \exp(Ks \times T(20 + \log t))\}\}$$

H:現在の硬さ、T:温度、t:時間

# 4. 検討内容

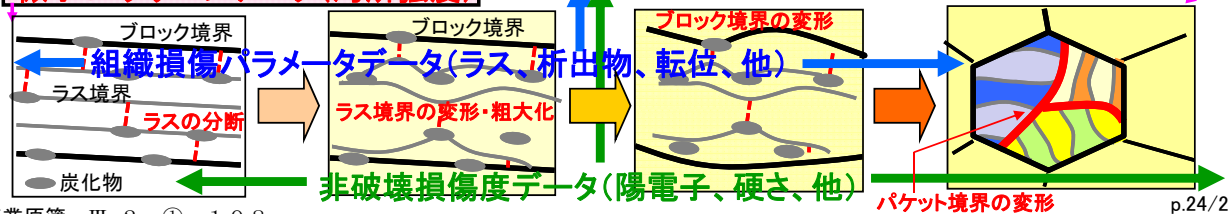
公開

## プラットフォームデータベースの相互関係



領域区分クリープデータ  
超低ひずみクリープデータ  
(極低応力強度)  
微小SPクリープデータ(局所強度)

強度・寿命の予測



● **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)

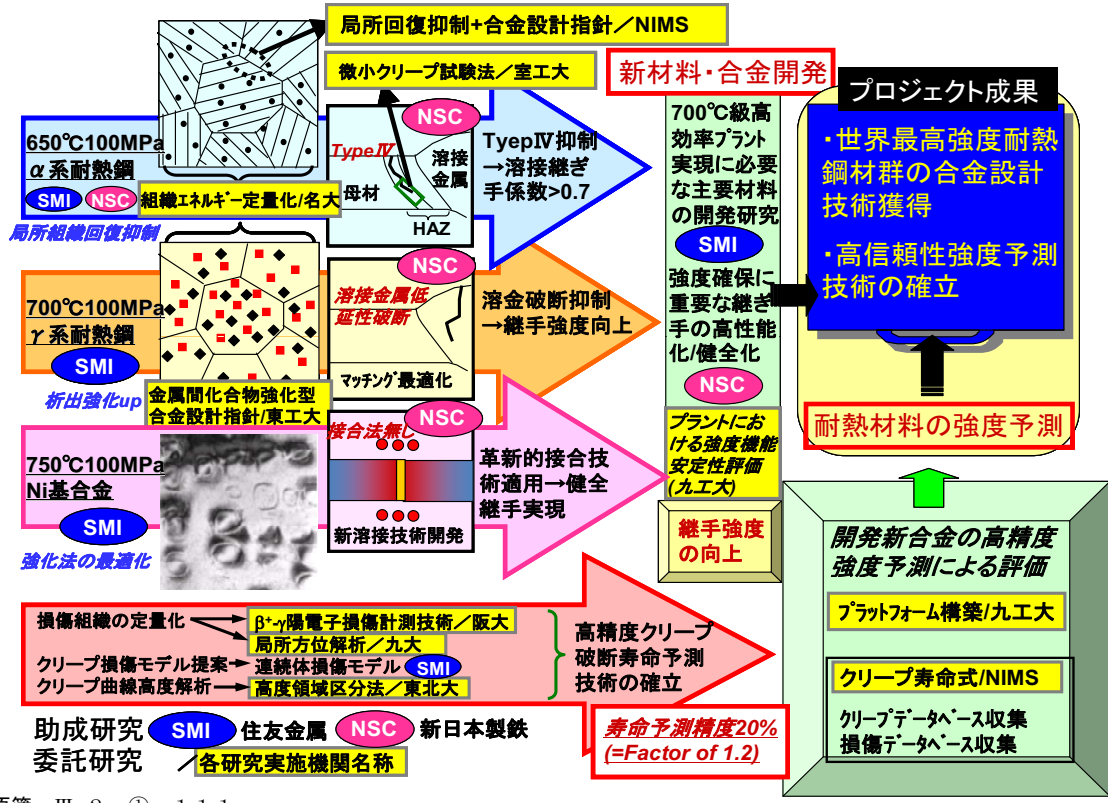
● **クリープ特性と組織劣化パラメータをリンクできるプラットフォームプロトタイプ提案**

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—





# 「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)

### 【制御鍛造SG(委託)】

- ②-1) 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究
- ②-2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術の開発

((財)金属系材料研究開発センター, (独)物質・材料研究機構, 東北大学, 豊橋技術科学大学, 名古屋大学, 大阪大学, 岡山大学)

平成21年7月3日(金)

1 / 19

## 内容

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り組み

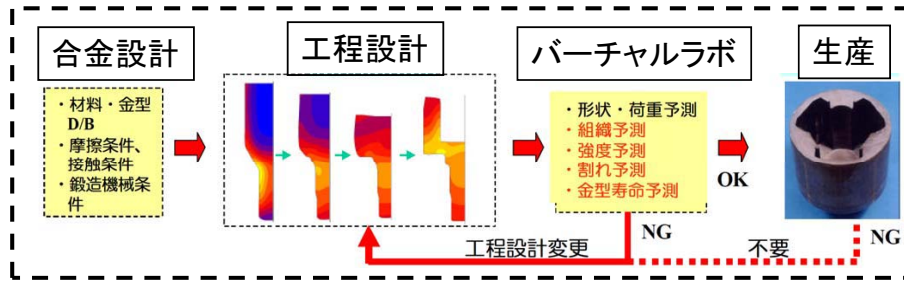
2 / 19



# 1. 背景

## バーチャルラボの必要性

試作によるトライアンドエラーの大幅削減、開発期間の短縮



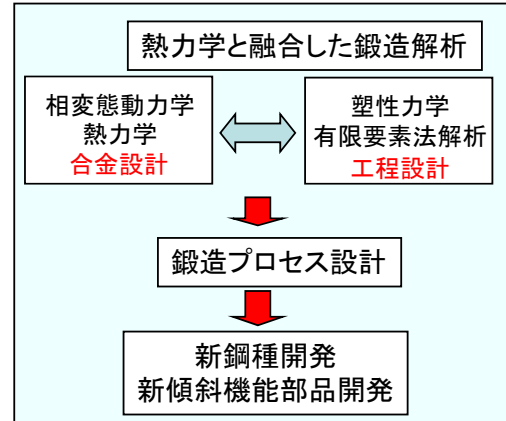
## 解決へのアプローチ

### 現状の鍛造シミュレーション

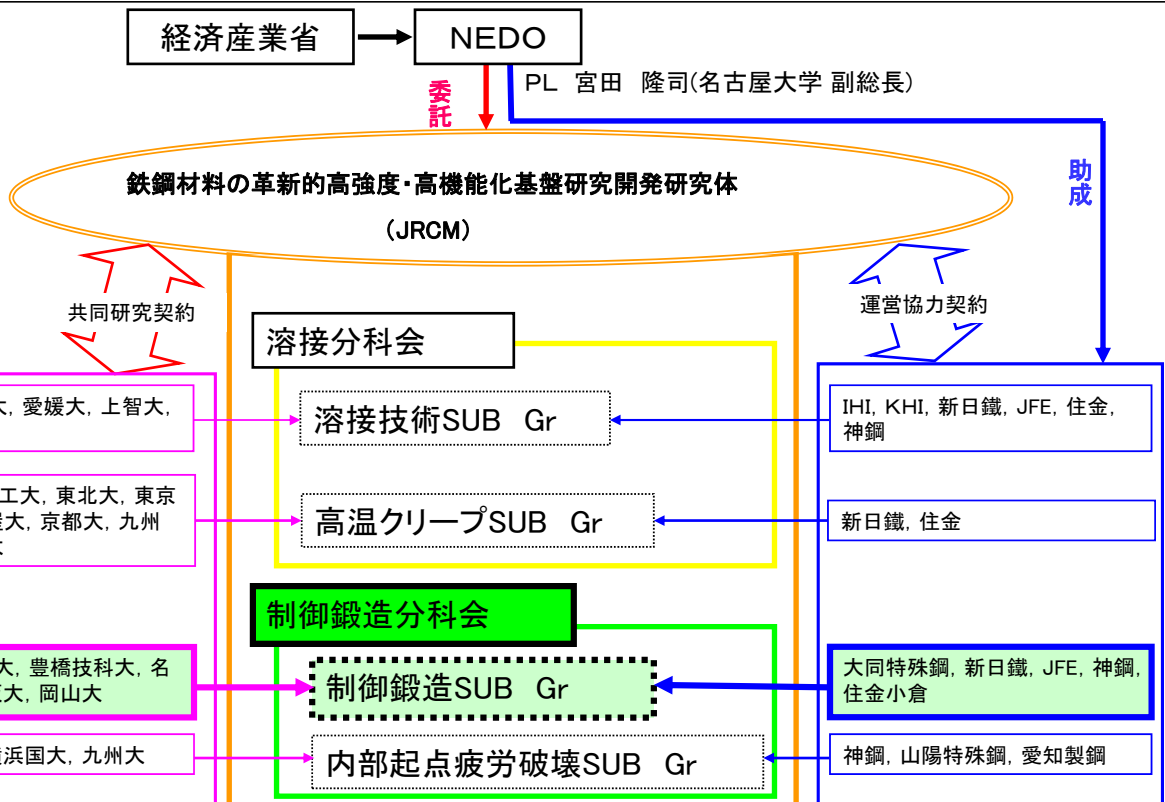
熱間圧延材の組織微細化モデルを応用  
析出物モデルは未開発

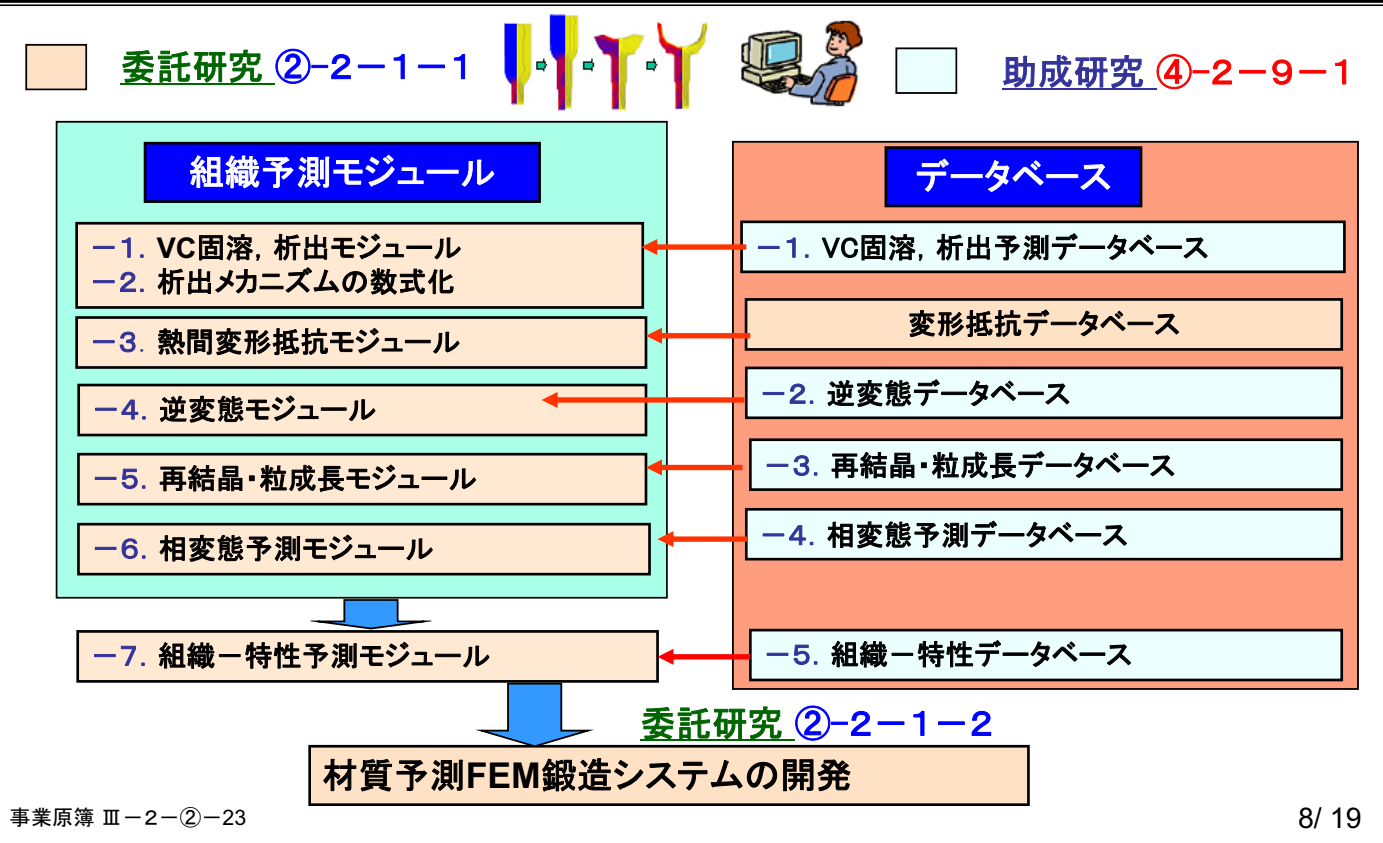
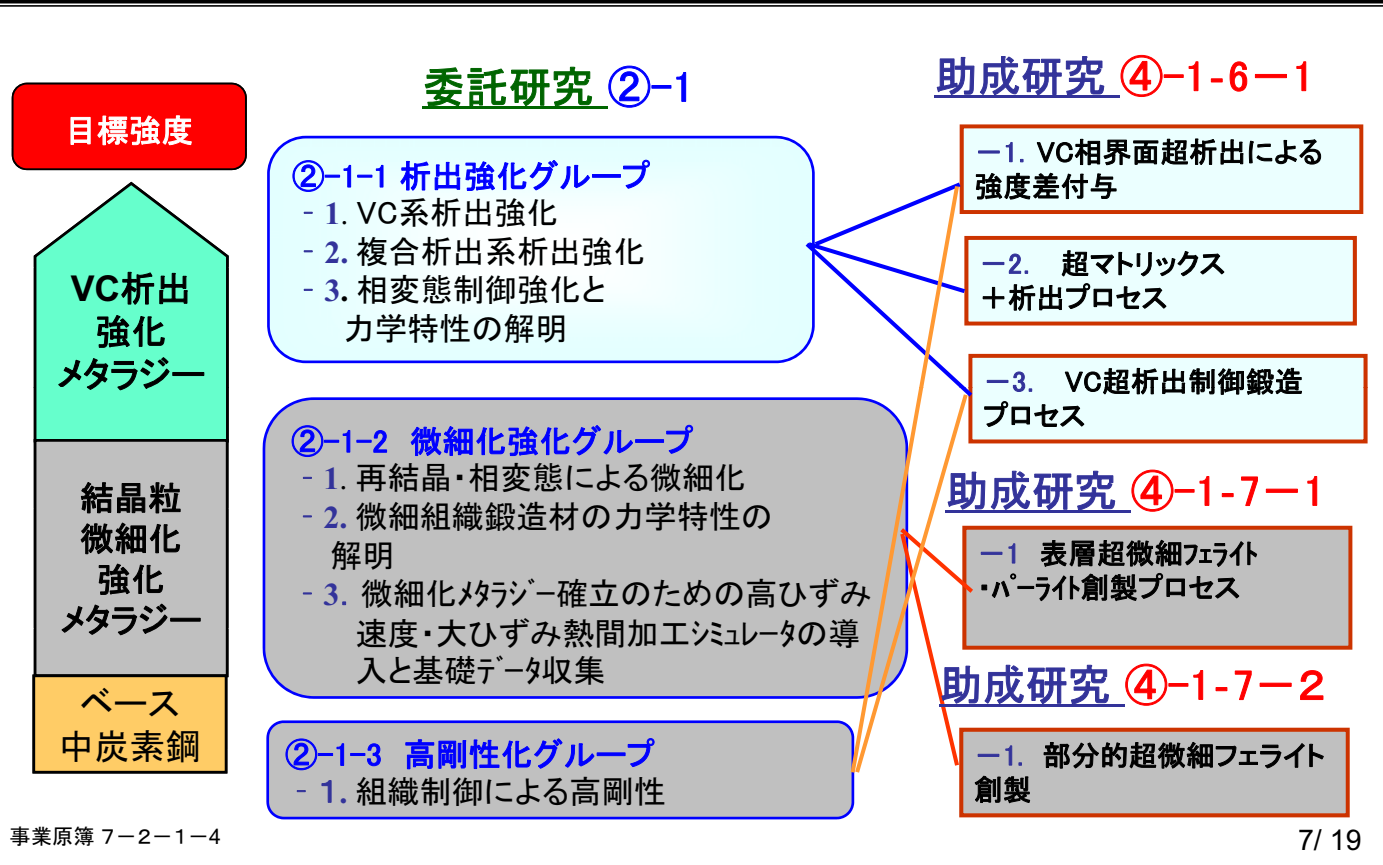
### 開発予定のバーチャルラボシステム

析出強化を含んだ  
「相変態動力学-熱力学」と  
「塑性力学による有限要素方解析」  
の融合による鍛造シミュレーション



# 2. 研究開発の実施体制







### 3. 開発目標と達成状況

公開

研究開発項目	中間目標	最終目標	成果	達成状況	最終目標の達成に向けた今後の取り組み
②-1)鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究	母材の析出強化最大化方策の抽出と鍛造プロセスによる細粒化指針提示	[基本計画目標] 降伏強度1000MPa以上でオーステナイト域(900°C)加工でフェライト粒2 $\mu\text{m}$ 以下、フェライト域およびフェライト+オーステナイト域加工でフェライト粒1 $\mu\text{m}$ 以下の超細粒の実現 [技術推進委員会の提言を受けた読替目標(案)] 降伏強度1000MPa以上を実現するVC析出形態と加工熱処理条件の明示	VC析出の定量的評価手法を新たに確立した。VC析出強化は低温ほど大きいこと、等温変態では析出強化を最大にする保持時間が存在すること、加工による変態促進により高温でもVC析出強化を大きくできることを示した	◎	開発プロセスにおいて高強度化と傾斜機能化を達成可能な制御指針を提示し、実鍛造プロセスにおいて降伏強度1000MPa以上を達成する
②-2)組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのパーソナルラボシステム基盤技術の開発	組織・硬さ分布予測可能なシステム構築(一般的な鍛造プロセス使用)	組織・硬さ分布予測可能なシステムの構築(開発鍛造プロセスを利用した、プロトタイプ試作モデルの強度測定によるシステム検証)	VCのオーステナイト中、フェライト中、ならびに相界面析出予測モジュールを構築し、一般鍛造プロセスにおけるV添加非調質鋼の組織と降伏強度の分布予測可能な有限要素解析システムを構築	◎	●開発鋼のプロトタイプ鍛造プロセスに適用可能なモジュール開発する 予測精度検証とモジュール間の連携強化による予測精度の向上に取り組む

論文数 3件 (今年度中に4件を予定)

### 4. 検討内容

公開

#### ②-1 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究

##### VC析出制御による高強度化

開発の狙い VC相界面析出による中炭素鋼の高強度化機構の解明

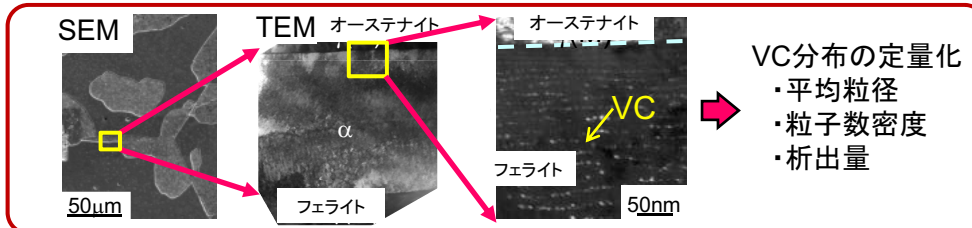
成果

1. 相界面析出VCの分布の定量評価法の確立
2. VC相界面析出組織の定量化による高強度化指導原理の明確化

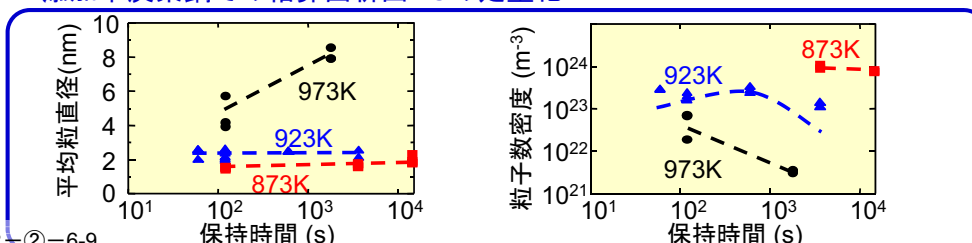
世界初!

→ 助成事業の降伏強度1000MPa達成に貢献

##### 相界面析出VCの定量化技術の確立



##### V添加中炭素鋼での相界面析出VCの定量化



## 4. 検討内容

公開

### ②-1 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究

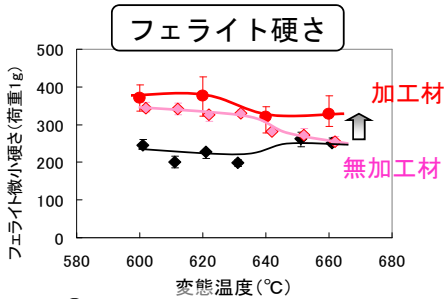
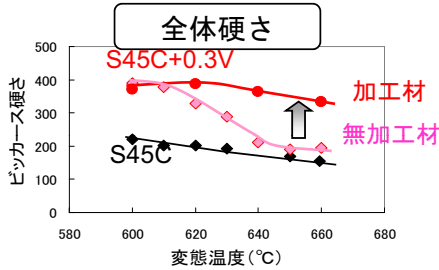
#### 相変態制御による析出強化量最大化

開発の狙い 高強度化のための加工熱処理プロセス条件の明確化

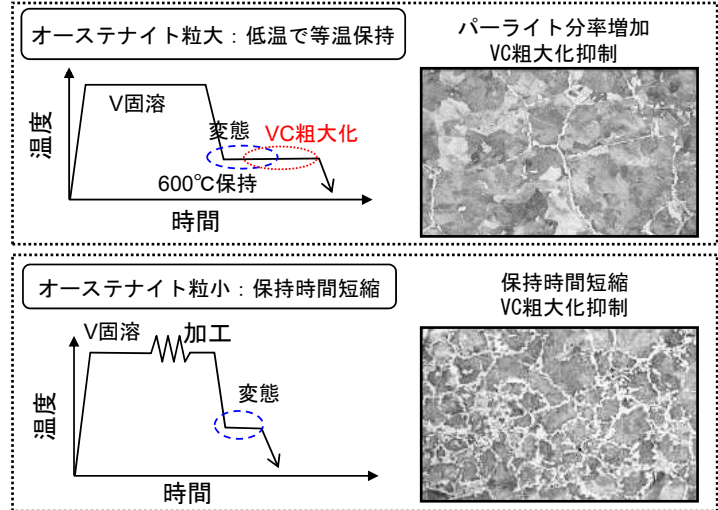
成果 変態温度制御、加工付与による保持時間短縮による析出強化量確保

→ 助成事業の降伏強度1000MPa達成に貢献

加工付与による  
析出強化量増大  
世界初!



#### 析出強化最大化方策



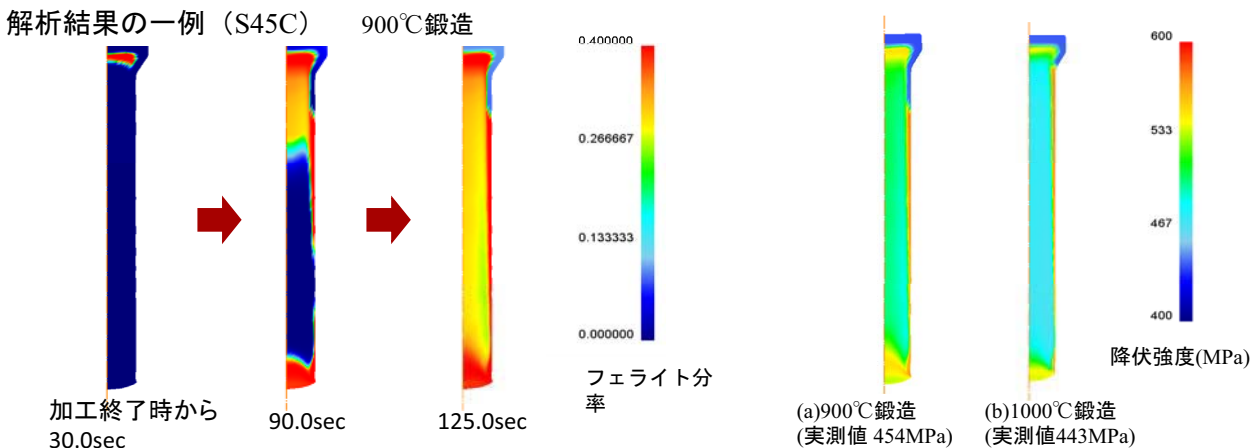
## 4. 検討内容

公開

### ②-2 特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術研究

#### 材質予測FEM鍛造システムの開発

各種組織予測モジュール(動的・静的再結晶, 相変態, VC析出, 強度予測)  
 それぞれをDEFORMに組み込み, 押し出しの変形解析を実施. 組織, 強度分布を解析



解析モード: 軸対称剛塑性解析(DEFORM-2D), 加工速度: パンチ速度200mm/sec(等速)  
 工具初期温度: 室温30°C(大気も同様), 変形抵抗: S45C(20~1100°C DB)  
 解析条件: ①鍛造温度1000°C→鍛造→放冷, ②鍛造温度900°C→鍛造→放冷  
 素材: ①S45C, ② S45C+0.3V

# 4. 検討内容

公開

## ②-2 特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術研究

### VC固溶・析出モジュールの開発

開発の狙い オーステナイト・フェライト中でのVC析出組織を予測できるモデル開発

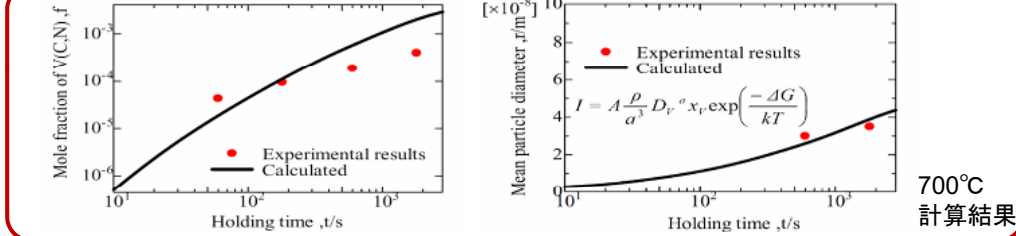
成果

1. オーステナイト中および相界面析出でのVC析出の実験的解明
2. オーステナイト中・フェライト中析出モデルの構築

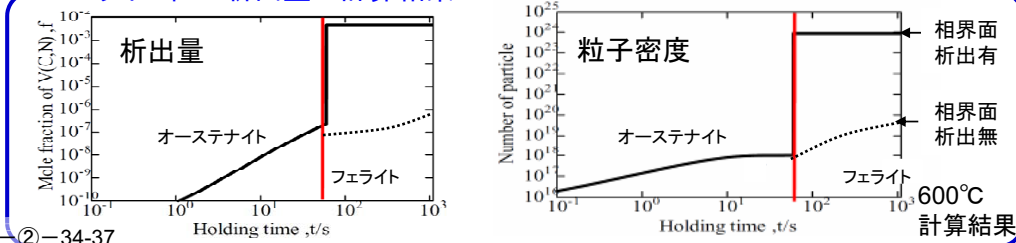
VC析出一貫モデル  
世界初!

→ VC析出を組み込んだバーチャルラボシステムの構築に貢献

#### オーステナイト中VC析出量と粒子径の実験と計算結果比較



#### フェライト中VC析出量の計算結果



# 4. 検討内容

公開

## ②-2 特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術研究

### 相変態予測モジュールの開発

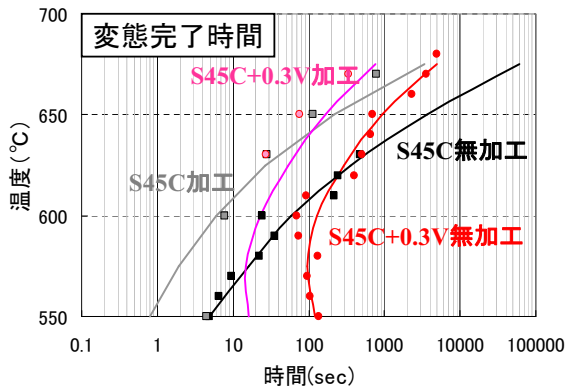
開発の狙い VC析出と相変態の相互作用を考慮可能なモデル開発

成果

- S45C、S45C+0.3V鋼の無加工材、加工材の相変態速度と組織因子モデル化

VC析出との相互作用考慮  
世界初!

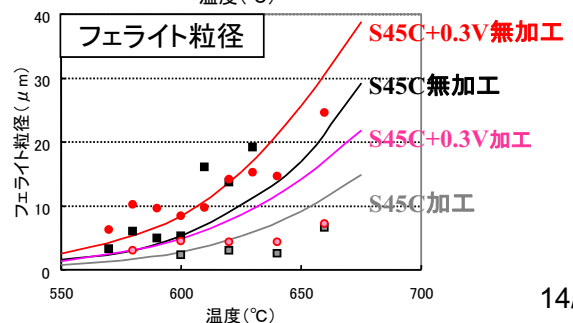
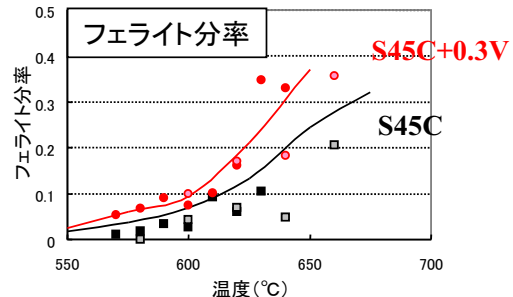
→ バーチャルラボシステムを用いた加工熱処理プロセス設計に貢献



$$X_{ferrite} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{24} I(T) \alpha(T)^3 t^{5/2}\right)$$

$$\alpha(T) = \frac{D^{1/2} (C_\gamma - C_0)}{(C_\gamma - C_{ferrite})^{1/2} (C_0 - C_{ferrite})^{1/2}}$$

$$X_{pearlite} = 1 - \exp(-K(T)t)$$



# 4. 検討内容

公開

## ②-2 特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術研究

### 組織-特性予測モジュールの開発

開発の狙い VC析出形態を考慮可能な降伏強度予測式の構築

幅広い鋼種に対して多くの組織-強度データを収集

成果

中炭素鋼以外にも適用可能な降伏強度予測式の構築

低~中~共析鋼に適用可能  
世界初!

→ 降伏強度分布の予測精度の向上

V無添加鋼

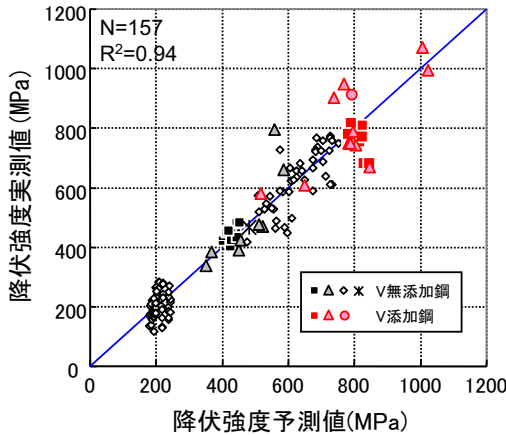
$$\text{降伏強度} = 280f_F + 370f_F d_F^{-1/2} + 190(1-f_F)S_0^{-1/2} + 2200(1-f_F)f_0 - 120$$

V添加鋼

$$\text{降伏強度} = 280f_F + 370f_F d_F^{-1/2} + 190(1-f_F)S_0^{-1/2} + 2200(1-f_F)f_0 - 120 + (370C_\gamma + 1300V_\gamma - 190)$$

析出強化量

H21年度中にVC析出形態を  
考慮可能な予測式を構築予定



適用範囲:

降伏強度	100-1100MPa
フェライト分率	0-100%
C濃度	0.02-0.79wt%
V濃度	0-0.5wt%
フェライト粒径	4-250 μm
ラメラ間隔	0.1-0.3 μm

V無添加/添加 低炭素鋼~共析鋼に  
適用可能な予測式を構築した

# 5. まとめと最終目標に向けた今後の取り組み

公開

## ②-1)鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究

達成状況



[中間目標] 母材の析出強化最大化方策の抽出と鍛造プロセスによる細粒化指針提示

[最終目標] 降伏強度1000MPa以上でオーステナイト域(900℃)加工でフェライト粒2 μm以下、  
フェライト域およびフェライト+オーステナイト域加工でフェライト粒1 μm以下の超細粒の実現

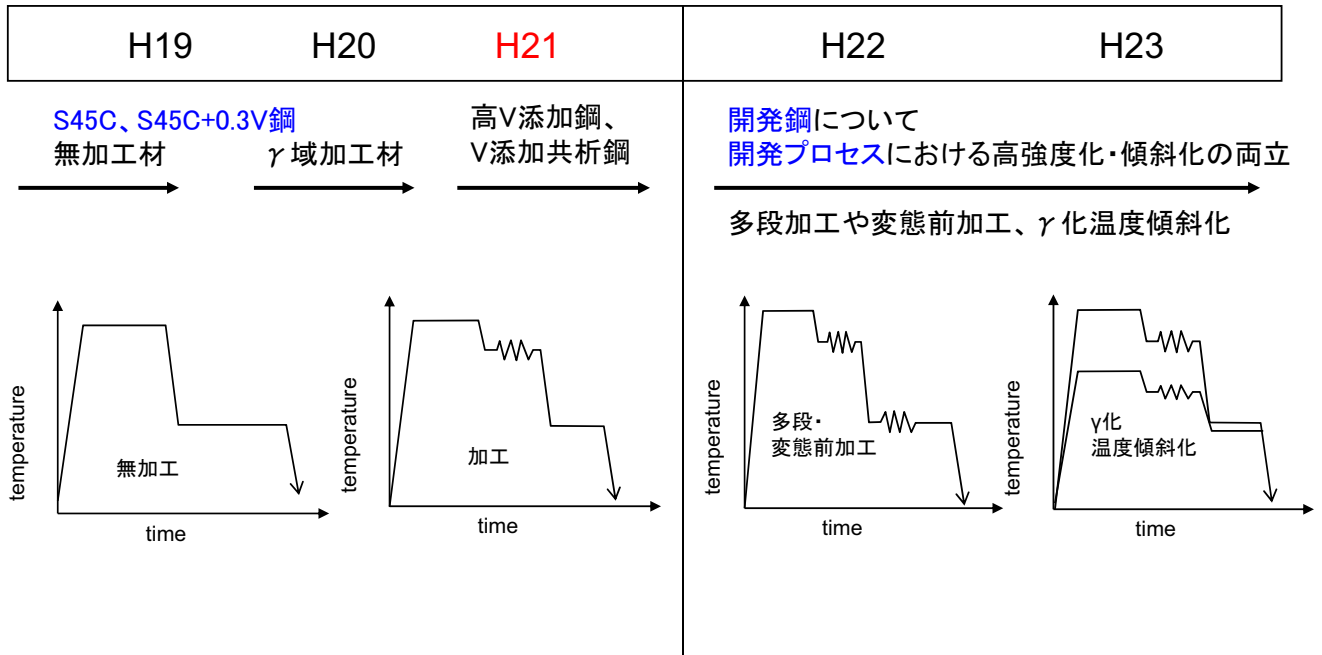
→ (技術推進委員会の提言を受けた読替目標(案))

降伏強度1000MPa以上を実現するVC析出形態と加工熱処理条件の明示

研究開発項目	成果	最終目標に向けた今後の課題と方針	最終目標
VC析出強化による高強度化	VC相界面析出の定量評価による 強化量最大化原理の解明 V,Cu複合添加による析出強化最大 化	実鍛造プロセスにおけるVC相界面析 出による高強度化原理の解明	析出制御により 降伏強度 1000MPa以上の 強度の実現
相変態制御による 析出強化量最大化	変態温度制御、 加工付与による保持時間短縮 による析出強化量確保	実鍛造プロセスにおいて 高強度化と傾斜機能化が達成可能な 加工熱処理条件の提案 (多段加工プロセスへの対応、 非強化部の強度制御法の考案)	



②-1)鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究



②-2)特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術研究

達成状況
◎

【中間目標】 組織・硬さ分布予測可能なシステム構築（一般的な鍛造プロセス使用）

【最終目標】 組織・硬さ分布予測可能なシステム構築（開発鍛造プロセス使用、プロトタイプ試作モデルにてシステム検証）

	H19	H20	H21	H22	H23
材質予測FEM鍛造システム	各モジュールの実装 ベース鋼の押出加工計算		VC析出一貫 モデルの実装	開発鋼のプロトタイプ鍛造プロセス計算 システム精度検証(モジュール間の連携)	
変形抵抗モジュール	S45C鋼について定式化		S45C+0.3V鋼	開発鋼についての低ひずみ域データ測定	
再結晶・粒成長モジュール	S45C鋼のモデル化		S45C+0.3V鋼	開発鋼モデル化、VC析出、相変態との連成	
VC固溶・析出モジュール	S45C+0.3V鋼の測定 オーステナイト中、 フェライト中析出モデル作成		パーライト中 析出モデル作成	開発鋼についての測定、モデル化	
相変態予測モジュール	S45C、S45C+0.3V鋼 変態モデル作成		適応鋼種の拡大 熱力学ベース予測	変態前加工実装 VC析出との連成	予測精度向上 精査モデル構築
組織-特性予測モジュール	降伏強度予測式構築 (V添加 低~共析鋼対応)		VC析出形態の考慮(VC析出との練成) 高V添加へ適用可能な予測式構築	予測精度向上 精査モデル構築	

## ②-2)特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術研究

### これまでの成果

- ベース鋼の一般鍛造プロセスについて鍛造中の非定常な析出挙動・組織形成を取り入れた、**世界初**の材質予測FEMを開発  
⇒ 合金・プロセス開発期間やコストの大幅削減、**世界に先駆けた傾斜機能付与技術の確立**に貢献

### 今後の取組み

強度の傾斜機能付与と合金設計が可能な熱力学ベースの材質予測FEMを開発し、開発鋼、開発鍛造プロセスに適用する。

### プロジェクト終了後のバージョンアップと普及の体制

- ・モジュール開発                      鉄鋼協会の研究会や大学で継続してモジュール開発を進める  
   ⇒ **基本プログラムの公開**
- ・プログラムの普及                    ベンチャー企業を立ち上げてプログラムの販売や計算の請負

→欧米にイニシアティブを取られているプログラム分野での巻返し

# 「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）

## 【内部起点疲労破壊SG(委託)】

②-3) 高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明

((財)金属系材料研究開発センター, (独)理化学研究所, 横浜国立大学, 九州大学)

平成21年7月3日(金)

## 内容

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
6. 最終目標に向けた今後の取組み

## 1. 背景(軸受鋼と転動疲労)

公開

CO<sub>2</sub>排出削減, 国内特殊鋼メーカーの世界競争力強化

技術開発動向、国際競争力状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向に適合

## 1. 対象

- 軸受鋼等を用いる機械構造用部材
- \* 2007年国内生産統計値(日本鉄鋼連盟): 軸受鋼947千ton/年, 機械構造用合金鋼3,999千ton/年

## 2. アプローチ

- 軸受等の部品小型化 = 高負荷応力化

## 3. 開発要求事項

- 使用条件の保証 → 寿命予測式
- 鋼材・製造方法の改良 → 介在物・組織制御指針

6308型番: 636g



同一荷重条件で使用  
 ・30-40%の重量削減  
 ・寿命3倍を保証

6208型番: 366g



## 1. 背景(現状の問題点)

公開

## 1. 内部疲労き裂発生(一軸/曲げ疲労=平面ひずみ状態に近似)

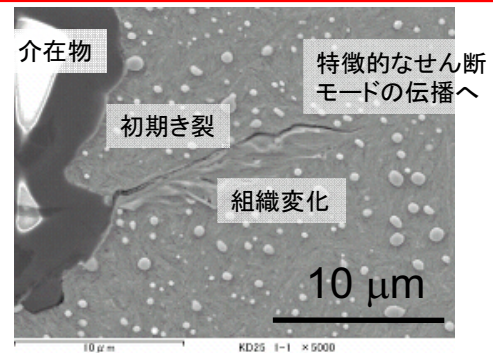
- ①不均一変形(高サイクル疲労)にともなう内部応力場の形成  
→ 転位下部組織やEBSD法からの推定(定性的)
- ②応力場を開放する変形集中や微小き裂形成  
→ 直接的な実験事実が得られていない
- ③限界サイズに成長した微小き裂の主き裂選択  
→ 一軸/曲げ荷重条件下では $\Delta K_{th}$ 概念により整理可能
- ④き裂伝播 → 一軸/曲げ荷重条件下では線形力学により計算可能

き裂発生過程の理解・  
シミュレーションは不十分

## 2. 転動疲労 = 複合的かつ上記技術の適用困難

- ①強圧縮(塑性変形量大) = 低サイクル疲労?
- ②介在物周りの応力集中と組織変化(WEA等)  
→ 直接は関係しない?
- ③局所損傷を経た初期き裂生成  
→ 限界サイズを未検出
- ④圧縮場のせん断モードによるき裂伝播と停留  
→ 動的観察結果がなく、高精度な寿命予測困難

理解困難



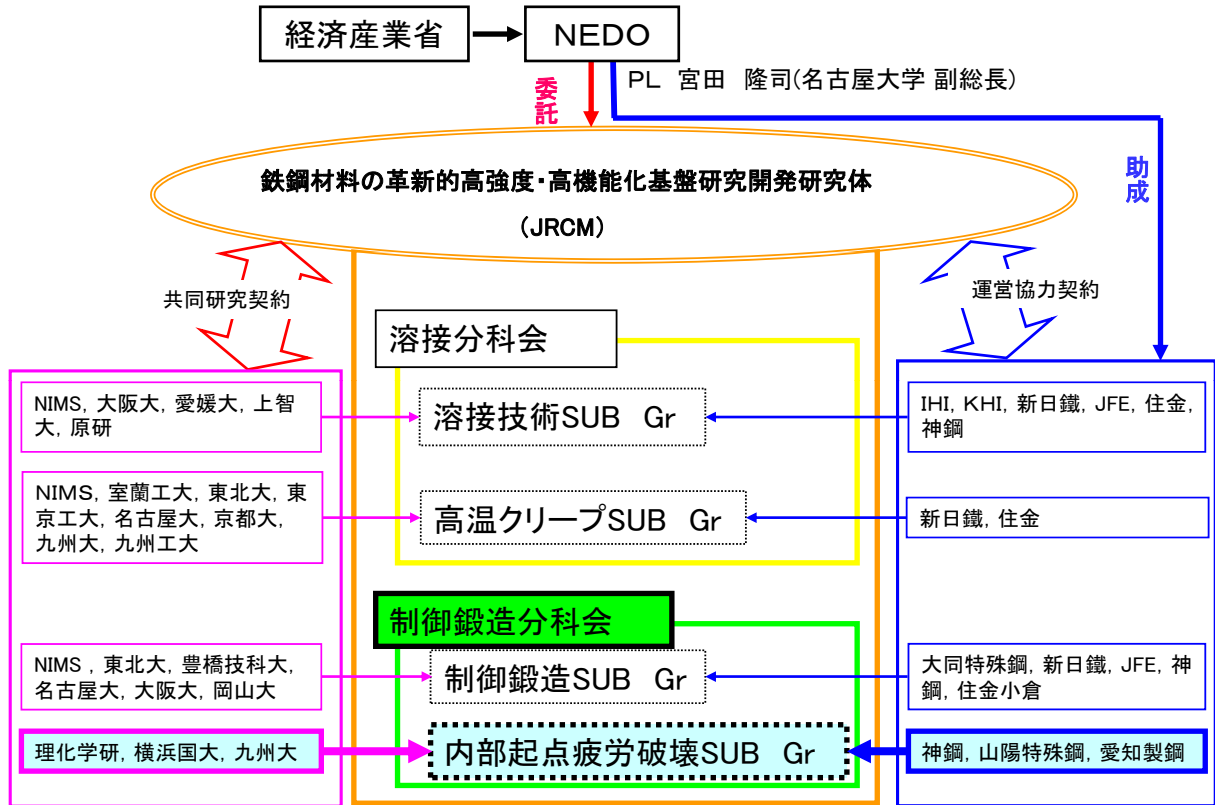
## 不可欠な解析技術の高度化とメカニズム解明

- 非破壊観察, 3次元高精度観察, 応力シミュレーション, き裂発生・伝播挙動
- 異なる研究分野の連携(従来にない) → 世界初・最高水準の技術の確立



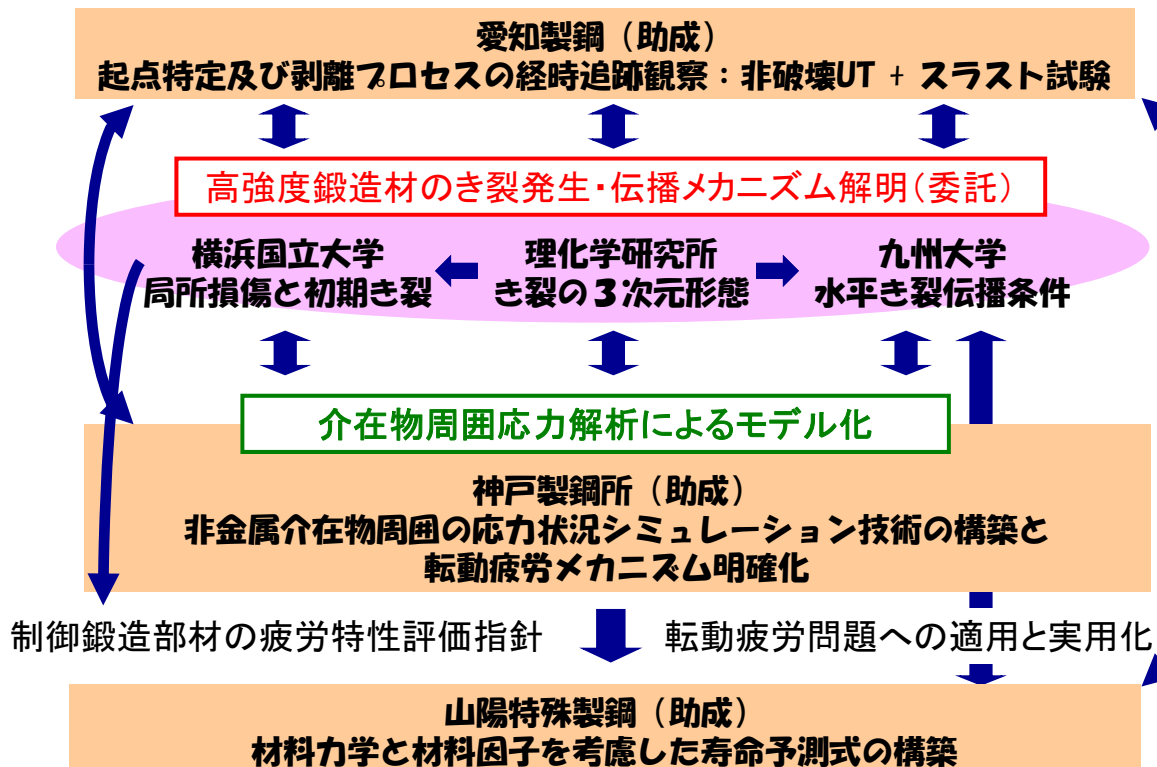
## 2. 研究開発の実施体制

公開



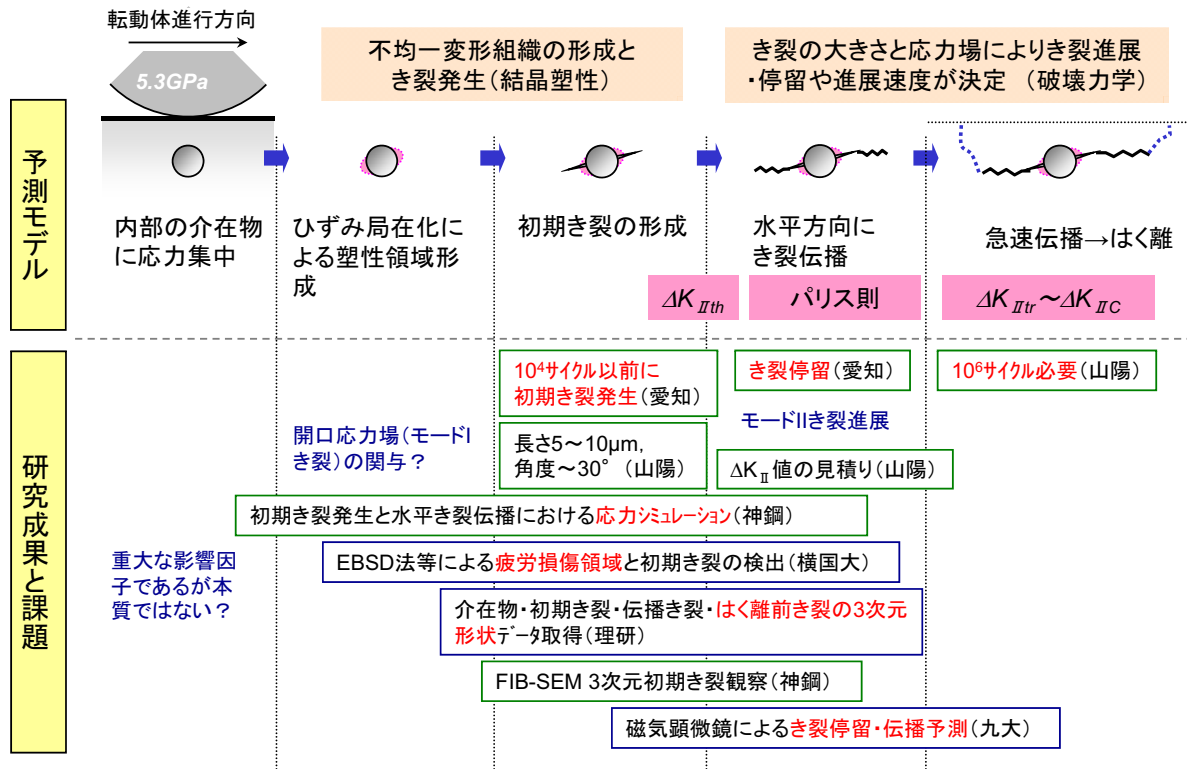
## 内部起点疲労破壊SubG

公開



# 転動疲労予測モデル

公開



## 3. 開発目標と達成状況

公開

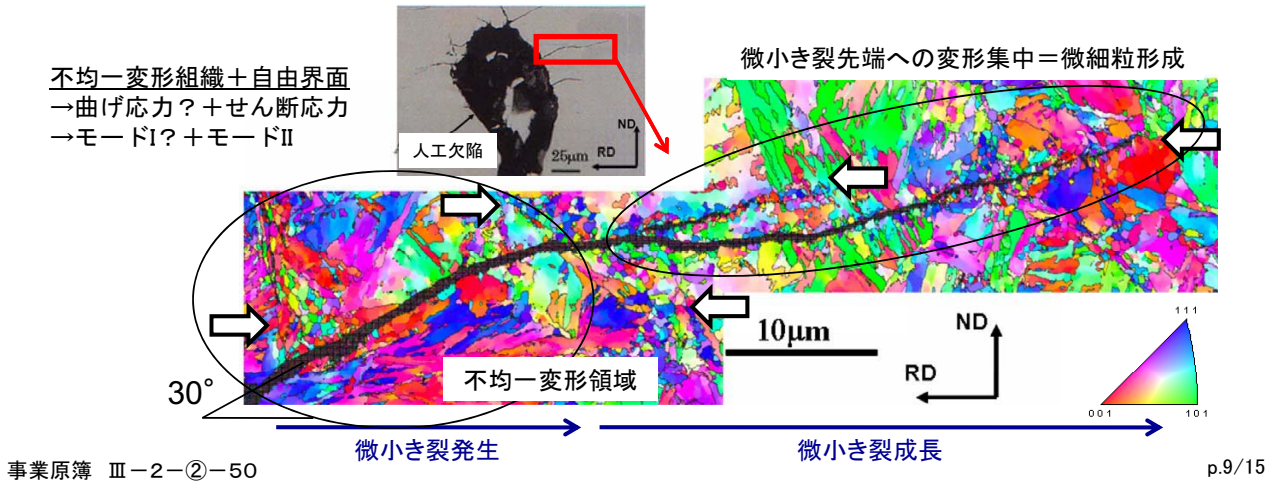
研究開発項目	中間目標	最終目標	成果	達成状況	最終目標に向けた今後の取組み
高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明	鉄鋼材料での疲労初期き裂の3次元観察基礎技術の確立	限界き裂長さに及ぼす非金属介在物と応力の影響を明確化	マルテンサイト鋼において、電子線後方散乱回折法による疲労損傷評価基礎技術、介在物の高速・自動切削法による3次元構造観察技術、磁場顕微法による疲労き裂先端の検出技術を開発し、疲労初期き裂の3次元観察技術の基礎を確立 論文4件投稿済み	◎	初期き裂起点となる介在物状態を明確にし、剥離に至るまでの過程を検証して、最終目標を達成できる見込み
	<p>a. 電子線後方散乱回折法の活用による疲労損傷評価技術</p> <p>b. 疲労初期き裂の3次元観察技術</p> <p>c. 疲労き裂周辺の3次元磁気測定によるき裂進展評価技術</p>	<p>a. 疲労損傷評価における介在物による応力集中の影響抽出</p> <p>b. 初期き裂形成に及ぼす介在物組成の影響明確化</p> <p>c. き裂の伝播・停留に及ぼす介在物や応力の影響抽出とモデル化</p>	<p>a. ひずみ勾配の可視化と組織変化の検出に成功し、き裂形成がひずみ勾配領域であることを発見</p> <p>b. フラットバイトと楕円振動切削を組み込んだ3次元内部構造顕微鏡を構築し、鉄系材料内部の介在物・き裂の3次元形状をサブミクロン精度で自動観察する手法を世界で初めて実現</p> <p>c. 磁場顕微鏡観察において、応力拡大係数と磁場の相関性を発見 構造物の疲労劣化診断の新技術開発に成功</p>		<p>a. 介在物周りの変形組織や介在物の剥離・割れと初期き裂形成との関係を抽出</p> <p>b. 介在物組成分析と高精細形態観察結果を基に各種介在物およびき裂の定量的評価パラメータを導出し、画像処理に基づく定量評価データベースを構築</p> <p>c. 磁場顕微鏡の高速データ処理により転動疲労き裂の停留・伝播状態を解析し、その力学要因解明とモデル化</p>

# 4. 検討内容

公開

## 鉄鋼材料での疲労初期き裂の3次元観察基礎技術の確立

- a. 電子線後方散乱回折法の活用による疲労損傷評価  
→ 強塑性変形条件下における局所損傷を経たき裂形成の理解が可能に
- b. 精密高速切削による3次元形態観察  
→ 介在物のはく離・割れ、初期き裂の形態が初めて明らかに
- c. 磁場顕微鏡による動的なき裂進展・応力拡大係数の検出  
→ 伝播・停留の力学的研究が可能に



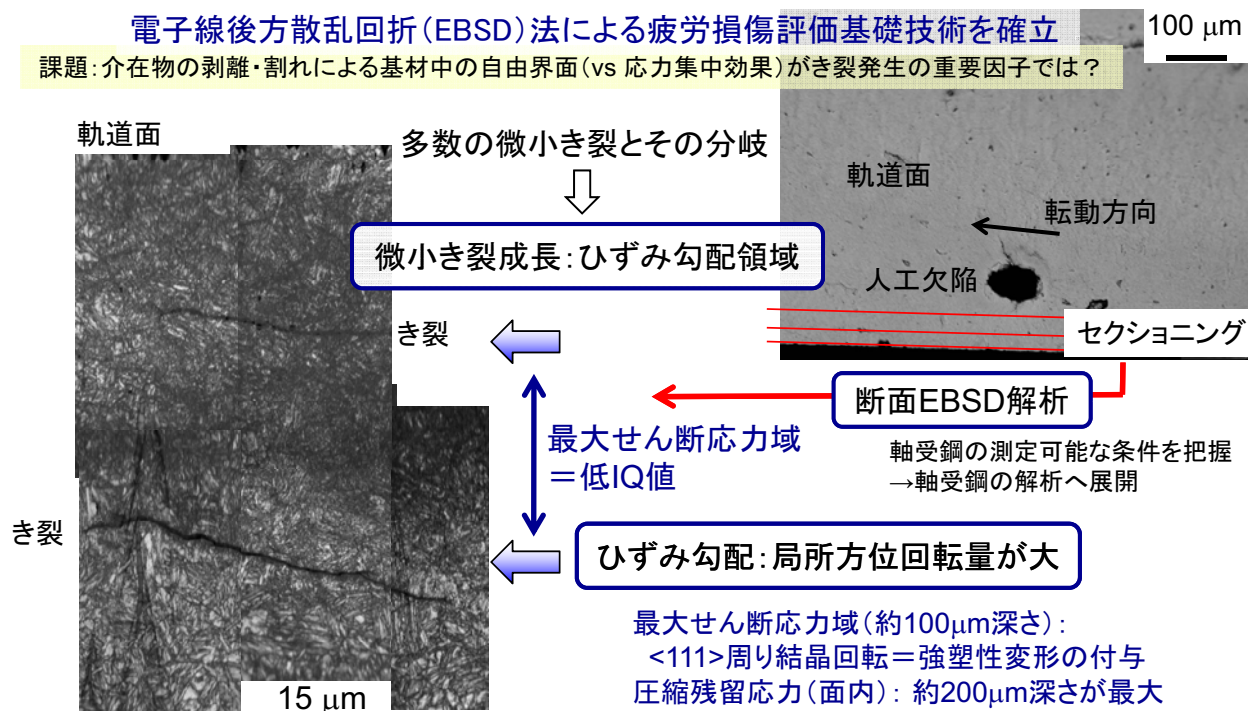
# ひずみ勾配とき裂形成

公開

「**転動疲労き裂はひずみ勾配領域に形成し、最大せん断応力域でないことを実証したのは、世界初**」

電子線後方散乱回折(EBSD)法による疲労損傷評価基礎技術を確立

課題: 介在物のはく離・割れによる基材中の自由界面(vs 応力集中効果)がき裂発生の重要因子では?



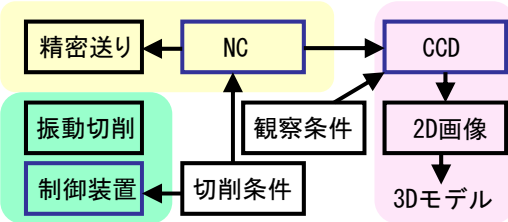
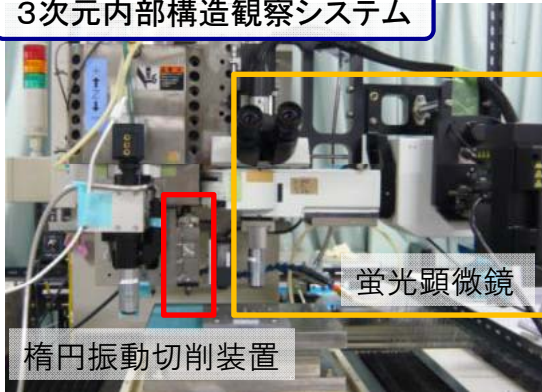


# 介在物と初期き裂の3次元形態

公開

「精密切削による鉄系材料内介在物の高速自動観察手法の確立は、世界初」

## 3次元内部構造観察システム

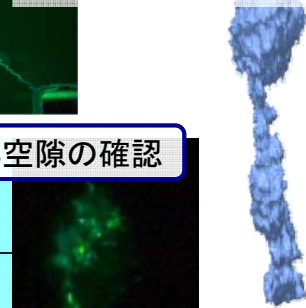
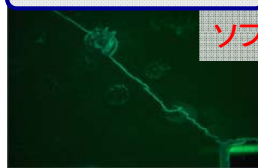


- ・介在物含有試験片の多断面・高速観察
- ・疲労試験片内の初期疲労き裂観察

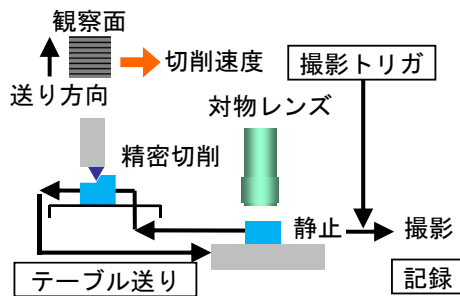
## き裂を明確識別

## 介在物の3次元構造

ソフトウェア公開 1件 (V-CAT)



## 介在物内部空隙の確認



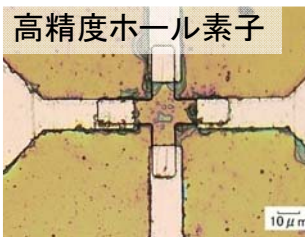
# 磁場顕微鏡によるき裂進展検出

公開

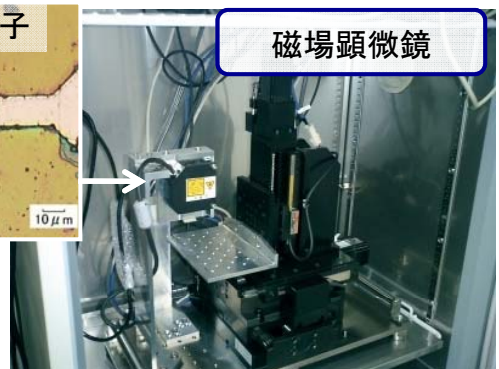
「磁場顕微鏡による疲労き裂先端の動的評価手法の確立は、世界初・最高水準」

## <磁場観察システム>

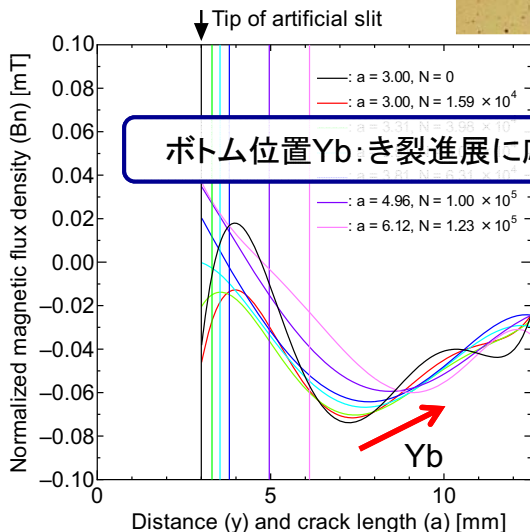
- き裂先端の塑性域拡大を検出
- 繰返し数毎の磁場分離
- 室温大気中・高精度・高分解能 (X線法の2000倍)



## 磁場顕微鏡



(高精度ステージ, 恒温環境, 防磁環境, 位置制御, データ分割)



ボトム位置Yb: き裂進展に応答

## 磁場の定量化: Yb-ΔK曲線の確立

応力拡大係数範囲ΔKとの相関性  
→ Activeなき裂の観察データから  
応力拡大係数を見積る

## 5. まとめ

公開

**中間目標「鉄鋼材料での疲労初期き裂の3次元観察基礎技術の確立」を達成**

- a. 電子線後方散乱回折(EBSD)法による疲労損傷評価基礎技術  
→汎用性(疲労損傷一般)／競合技術(100倍空間分解能 vs X線回折法)  
■マルテンサイト鋼の転動疲労材においてひずみ勾配の可視化と組織変化の検出に成功  
■き裂形成がひずみ勾配領域であることを**発見**
- b. 介在物の高速・自動切削法による3次元構造観察技術 **世界初**  
→汎用性(3次元・高速欠陥検出)／競合技術(50倍高速 vs シリアルセクションング)  
■フラットバイトによる高速切削を実現  
■1辺1mmの立方体空間をサブミクロン精度  
■切削-蛍光染色観察の自動システムを構築
- c. 磁場顕微法による疲労き裂先端の検出技術 **世界初**  
→汎用性(き裂伝播一般)／競合技術(2000倍高速 vs X線応力測定)  
■き裂観察から応力拡大係数を見積もる技術(従来不可能)の開発  
■3次元磁場顕微観察において、応力拡大係数と磁場の相関性を**発見**

## 6. 最終目標に向けた今後の取組み

公開

**最終目標「限界き裂長さに及ぼす非金属介在物と応力の影響を明確化」達成に向けて**

### 【課題】

**初期き裂起点となる介在物状態を明確にし、剥離に至るまでの過程を検証**

- き裂発生的重要因子を抽出(不均一変形組織の形成, 介在物の剥離・割れ)
- 介在物およびき裂の定量的評価パラメータ導出とデータベース構築
- 転動疲労き裂における停留・伝播の力学要因とモデル化

### 【解決の道筋】

**各種介在物起点き裂による検証**

- ひずみ勾配に着目したマルチスケール分析と介在物周りの精緻な観察**  
→介在物界面における初期き裂発生を観察データ取得
- 各種介在物の切削条件探索、高分解能・ハイスループット観察・定量化法確立**  
→画像処理・解析技術に基づいた介在物・き裂形態の数量化高精度モデル作成
- 物理的に最小化した近接センサーと高速データ処理による広領域・3次元観察**  
→開発技術(磁場顕微法)により転動疲労き裂の力学的評価を達成する見込み



## 研究計画の展開

公開

研究開発項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度
(助成) 転動疲労中の剥離プロセスの非破壊的経時変化観察技術高度化と剥離プロセス概況把握	酸化物系介在物を疲労き裂起点とした、剥離プロセスの経時的概況把握			MnS、TiN系介在物を起点とした疲労き裂確認	全介在物(酸化物、MnS、TiN)に関する剥離プロセス概況把握
(委託) 高強度鋼の局所的疲労損傷分布評価技術確立と影響因子の明確化	局所的疲労損傷分布評価の基礎技術検証	マルテンサイト鋼人工欠陥材における転動疲労損傷評価への適用	転動疲労損傷評価への適用 各機関からの依頼分析	介在物周りの応力重量状態の検討	転動疲労損傷に及ぼす組織要因の抽出とき裂発生機構のモデル化
(委託) 高強度鋼の初期き裂形態3次元観察および介在物組成評価技術の確立	鉄鋼材料内介在物観察に向けた切削条件・観察手法の開発		楕円振動切削装置による切削条件最適化	介在物組成の分析と介在物および周辺き裂の観察	き裂及び介在物の定量的評価パラメータの導出とデータベースの構築
(助成) 非金属介在物周囲の応力状況シミュレーション技術の構築と転動疲労メカニズム明確化	応力シミュレーション基本モデル構築	FIB-SEMIによる高分解能3次元観察技術		介在物組成情報を含む観察データの取得	応力シミュレーション活用による転動疲労機構解明
		初期き裂形態に及ぼす酸化物系介在物の要因抽出		MnS、TiN系介在物の応力シミュレーション	
(委託) 高強度鋼の初期き裂進展状況評価技術確立と影響因子明確化	き裂評価方法の新規開発	3次元測定システムの高精度化	き裂先端の高領域可視化システム構築と空間分解能の向上	転動疲労対応システム構築とき裂進展状態の観察	き裂進展挙動あるいは停留に及ぼす種々要因の抽出とモデル化
(助成) 材料力学と材料因子を考慮した寿命予測式の構築	酸化物系介在物起点における寿命予測式立案を目的としたサンプル試作と寿命試験の実施			介在物と初期き裂長さとの関係を明確化し、寿命予測精度の向上を図る	全介在物(酸化物、MnS、TiN)に関する寿命予測式の完成とその検証