

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

# 「発電プラント用超高純度金属材料の開発」 (事後評価)

(2005年度～2010年度 6年間)

=プロジェクトの概要(公開) =

NEDO エネルギー対策推進部

2011年6月21日

## 目次

### I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置付け
2. NEDOの関与の必要性

### II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標
2. 事業の計画内容
3. 事業の実施体制
4. 情勢変化への対応
5. 中間評価結果への対応

### III. 研究開発成果について

1. 目標達成状況
2. 研究開発項目毎の成果

### IV. 実用化、事業化の見通しについて

1. 実用化、事業化の見通し
2. 成果の普及

## I. 事業の位置付け・必要性について (2) 事業目的の妥当性

事業原簿3-4頁

**事業の背景**

近年、省資源・省エネルギー、レアメタルの枯渇への対応、地球環境問題への対応あるいは安心・安全な社会の構築等を実現する観点から、高温強度、疲労強度等の機械的性質や耐食性、耐応力腐食割れ性等の耐環境性に優れた新しい金属材料の開発が切望されている。

具体的には、発電プラント等では、高温腐食や摩耗あるいは応力腐食割れに起因する事故が発生しており、材料自体の耐環境特性の向上が望まれている。さらに、より高温、過酷環境で利用できる構造部材が開発されることによる発電プラントの効率向上に伴う省エネルギー(燃料消費量の低減)、地球環境問題への対応(CO<sub>2</sub>削減)や、部材交換頻度の減少等に伴う安全で耐久性の高い発電プラントの実現、発電コスト軽減等が期待される。

**事業の目的**

現状、材料コストが高い超高純度金属材料をその優れた特性を維持しながら、量産化・低コスト化するための各種製造技術を開発するとともに、開発材の産業(発電プラント等)への適用性を明らかにすることを目的とする。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 3

## I. 事業の位置付け・必要性について (2) 事業目的の妥当性

事業原簿 5頁

**事業の位置付け**

金属の超高純度化により、従来の材料より遙かに優れた特性(耐環境性、靱性、加工性等)を有することを確認したナノメタル技術プロジェクト(NEDO事業)での成果を踏まえ、超高純度金属材料(超高純度Fe-Cr合金等)を産業化することは、我が国の発電、素材産業の発展に大きく貢献する。

**【研究開発プログラム】**

- ・資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「**エネルギーイノベーションプログラム**」の一環として実施する。
- ・情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新(ジャンプアップ)をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、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等を可能とすることを目的とした「**ナノテク・部材イノベーションプログラム**」の一環として実施する。

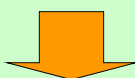
事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 4

I. 事業の位置付け・必要性について (1) NEDO事業としての妥当性

事業原簿1-2頁

**NEDOが関与する必要性**

- ・超高純度金属材料は、耐環境性、靱性、加工性等が従来の材料と比較し遙かに優れた特性を有していることが明らかになっている。
- ・超高純度金属材料は新しい材料であり、産業化のためには優れた特性を維持しつつ材料の低コスト・量産化等に検討課題が多く存在し、開発には大きなリスクを伴い、民間だけでは実施が困難である。



産学官の連携のもと統合的、効率的にプロジェクトを進めるため、NEDOが関与して進めていく必要がある。

I. 事業の位置付け・必要性について (1) NEDO事業としての妥当性

事業原簿2頁

**実施の効果**

- ・発電設備等の耐食、耐圧部材の信頼性の大幅向上による安心・安全社会への貢献  
(対象製品: 腐食や応力腐食割れが問題となる発電設備等の各種配管類、脱硫機器等)
- ・発電プラントのエネルギー効率向上(蒸気温度が数十℃上昇できた場合、プラント効率が2~3%向上)による化石燃料使用量削減(CO<sub>2</sub>削減等環境問題対策)及び配管の熱伸び低減による構造簡素化  
(対象製品: 火力発電プラント、石炭ガス化炉、廃棄物燃焼ボイラ等)
- ・分散電源の効率向上による省エネルギー、CO<sub>2</sub>削減並びに快適性向上  
(対象製品: 重油燃焼小型ガスタービン等)

II. 研究開発マネジメントについて (1) 研究開発目標の妥当性

事業原簿6-7頁

事業の目標 (1)

開発項目	研究開発目標
① 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発	①-1 現状の市販CaOルツボに比較して溶湯の純度を下げず、3倍以上の耐久性(溶解回数10回以上)の新規高耐久ルツボを開発する。(想定コストは100kg用1個当たり40万円)
	①-2 低コスト原料からC、Si、Mn、P、S、N、Oの不純物総量50ppmレベル以下の超高純度金属材料を得るために必要な溶解量100kg級の高真空誘導溶解炉を開発する。
② 開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価	②-1 不純物濃度と各種特性の関係を明らかにする。
	②-2 新材料による部材の開発と評価 (詳細別紙)
	②-3 超高純度金属材料の特性評価結果、コスト試算結果等から、対象とするシステムのメリットが現用材を用いたシステムより優れることを確認する。

II. 研究開発マネジメントについて (1) 研究開発目標の妥当性

事業原簿6-7頁

開発項目	研究開発の具体的内容
②-2 新材料による部材の開発と評価	(a)実用化検討部材(プロジェクト期間終了時に実機に適用できる目処を立てるもの) 開発材料を火力発電プラントの煙突ライナー・煙道等に適用できる見通しを得るために以下の目標を達成すること。 ○候補材料系:Fe-20Cr系超高純度合金 ・現用材であるSUS316の10倍以上の硫酸露点腐食に対する耐食性(溶接部を含む) ・室温耐力200MPa以上 ・現用材であるSUS316と同程度の薄板加工性及び溶接性の確認 ・想定コストは1万円/kg以下(量産時)
	(b)中期的開発部材(2015年頃に実用化が期待できるもの) 開発材料を廃棄物発電プラントの過熱器管に適用できる見通しを得るために以下の目標を達成すること。 ○候補材料系:Fe-20~30Cr系超高純度合金又はFe-Cr-Ni系超高純度合金 ・現用材であるSUS310Lの5倍以上の廃棄物発電環境での耐食性(溶接部を含む) ・室温耐力200MPa以上、伸び30%程度 ・現用材であるSUS310Lと同程度のチューブ加工性及び溶接性の確認 ・想定コストは1万円/kg以下(量産時)

II. 研究開発マネジメントについて (1) 研究開発目標の妥当性

事業原簿6-7頁

開発項目	研究開発の具体的内容
②-2 新材料による部材の開発と評価	<p>((c)長期的開発部材(2030年頃に実用化が期待できるもの) 平成22年度においては、開発材料を700℃先進超々臨界圧火力発電プラントの過熱器管に適用できる見通しを得るため、以下の目標を達成すること。</p> <p>○候補材料系: Fe-Cr-Ni系超高純度合金</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実用化段階の目標である700℃、10<sup>5</sup>時間におけるクリープ破断強度が70MPa以上であることを見通すため、プロジェクト終了時に得られたクリープ破断データから外挿した700℃、10<sup>5</sup>時間のクリープ破断強度が70MPa以上であること。</li> <li>・現用材であるSUS304 J1HTBと同程度の加工性と溶接性があること。</li> <li>・既存加工プロセスで製作が可能なこと。</li> </ul>

II. 研究開発マネジメントについて (2) 研究開発計画の妥当性

事業原簿8頁

研究開発の内容

① 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発

= 【作る技術】の研究開発

①-1 高耐久ルツボ・耐火材の開発

従来ルツボでは溶鋼中に不純物が溶出し、溶鋼を汚染  
⇒ ・溶鋼への不純物溶出の少ない、高耐久ルツボを開発する  
・大型化に向けた耐火材製造技術を開発する。

①-2 新規精錬技術開発

超高純度金属の溶製が高コスト  
⇒ ・低コスト原料から超高純度金属材料を得るためのシステム及び技術を開発する

①-3 高真空誘導溶解炉の開発

超高純度金属材料を得るために必要な溶解量100kg級の高真空誘導溶解炉を開発する。

①-4 認証用標準物質の作製

超高純度鉄を作製、認証用標準物質登録により、標準化に寄与

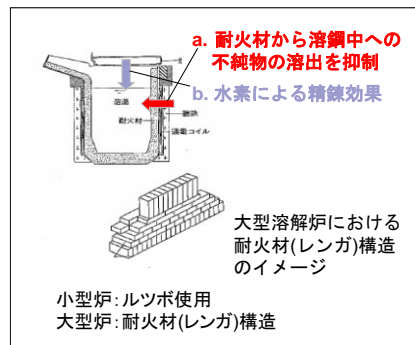


図 高真空誘導溶解炉とその大型化展開のイメージ

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて (2) 研究開発計画の妥当性

事業原簿8-9頁

研究開発の内容

②開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価

= 【使う技術】の研究開発

②-1 超高純度金属材料の開発

超高純度金属材料を実用性検討部材、中期的開発部材、長期的開発部材の各カテゴリーに分けて開発し、各カテゴリーに対応した目標特性を評価する。

②-2 部材製造技術開発

超高純度金属素材の優れた材料特性を保持し得る各種部材製造技術(接合、塑性加工、機械加工等)を開発する。

②-3 実プラントによる実用性評価試験

腐食環境を有する実プラントに供試材を装荷し、実環境下での長期耐環境性を実証する。

②-4 システムメリットの試算

超高純度金属材料を用いた機器により構成されるシステムのシステムメリットを試算し、現用材と比較して優位性があることを確認する。

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて (2) 研究開発計画の妥当性

事業原簿10頁

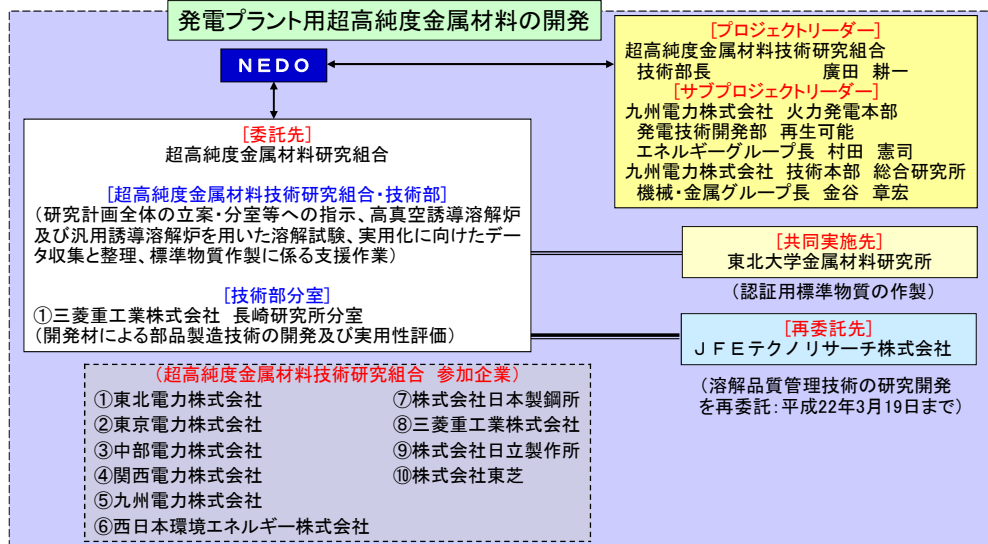
事業計画

開発項目	17FY	18FY	19FY	20FY	21FY	22FY	
<b>①低コスト・量産化製造技術開発</b>							
①-1 高耐久ルツボ・耐火材の開発	[Red bar spanning 18FY to 22FY]						
①-2 新規精錬技術開発	[Red bar spanning 18FY to 22FY]						
①-3 高真空誘導溶解炉の開発	[Red bar spanning 18FY to 22FY]						
①-4 認証用標準物質の作製						[Red bar in 22FY]	
<b>②部品製造技術開発及び実用性評価</b>							
②-1 超高純度金属材料の開発		[Red bar spanning 18FY to 22FY]					
②-2 部材製造技術開発	[Red bar spanning 18FY to 22FY]						
②-3 実プラントによる実用性評価試験				[Red bar in 20FY]	[Red bar in 21FY]		
②-4 システムメリットの試算	[Red bar spanning 18FY to 22FY]						
開発費(百万円)	199	922	400	413	250	90	総額 2,274

II. 研究開発マネジメントについて (3) 研究開発実施の実施体制の妥当性

研究開発の実施体制 (プロジェクト終了時)

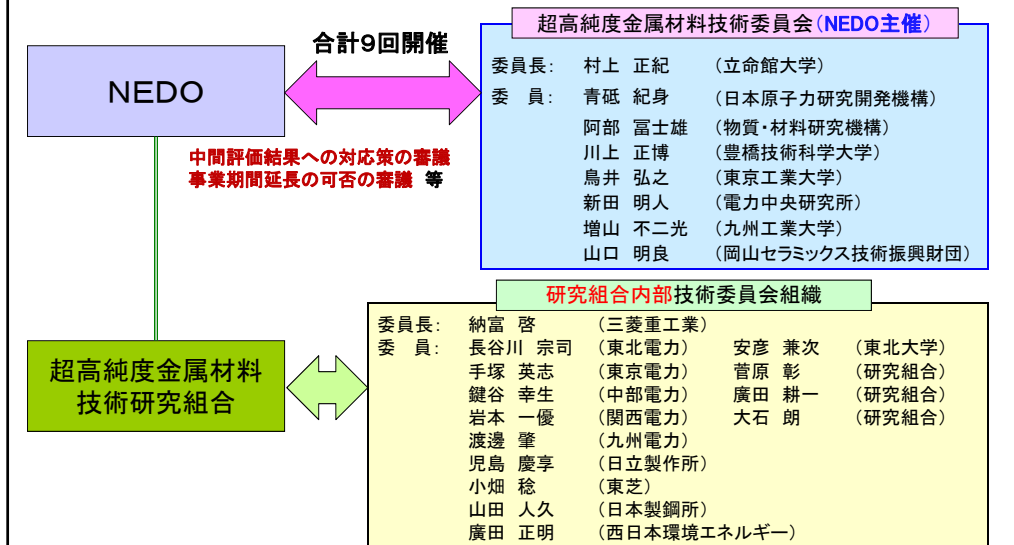
事業原簿11-12頁



II. 研究開発マネジメントについて (3) 研究開発実施の実施体制の妥当性

研究開発の実施体制 (支援体制)

事業原簿13頁



## II. 研究開発マネジメントについて

### (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

事業原簿13-14頁

#### 技術委員会の開催

##### 例1: 中間評価前後での研究開発への助言・審議

- 平成19年3月16日(第2回)
  - ・中間評価に向けた研究開発の方向性や結果の整理に関して協議  
⇒試験内容が多岐に渡っており、実施内容の絞り込みも必要と  
いった議論の中身を、中間評価に向けた資料作成等に反映。
- 平成19年12月13日(第3回)
  - ・中間評価結果の説明と対応策に関する協議  
⇒高純度化による特性改善メカニズムまで分からずとも、どのような  
成分が影響するかが分かると良いといった意見を、中間評価への  
対処方針案へ反映。
- 平成20年2月29日(第4回)
  - ・中間評価結果への対応策及び基本計画変更に関する審議  
⇒開発対象の絞り込みや目標値の妥当性について審議し、了承。
- 平成20年5月15日(第5回)
  - ・基本計画変更の報告と実験手法に関する協議  
⇒論理的な実験計画立案についての議論をプロジェクト運営に反映。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 15

## II. 研究開発マネジメントについて

### (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

事業原簿13-14頁

#### 技術委員会の開催

##### 例2: プロジェクト期間見直しへの助言・審議

- 平成21年12月21日(第7回)
  - ・平成21年度の成果を報告し、産業界での研究に繋げるために1年  
延長して技術の見極めを行うことについて協議  
⇒実用化への距離が大幅に縮まることや次に誰かが取り組もうと  
する時に出発点となる基礎的なデータが揃えることが必要。  
⇒何が分かれば次に繋げられるのかといことをはっきりして欲しい。  
といった議論がなされ、NEDOと委託先で検討することとした。
- 平成22年1月26日(第8回)
  - ・委員会での議論を踏まえた平成22年度実施内容(クリープの加速  
試験、異材溶接継手の評価等)と基本計画変更案を審議  
⇒産業化のためにどのような条件で評価すべきか、どの材料を  
集中的に評価すべきか、といった点も協議され、プロジェクト期間  
の延長を含む基本計画の変更案と平成22年度実施内容を了承。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 16



## II. 研究開発マネジメントについて 3. 情勢変化への対応

事業原簿15頁

### 情勢変化への対応

- (1)平成18年度に、耐火材の改質技術について、熔融金属への汚染が少なく劣化のない新規耐火材について成果が得られたため、**改質による耐火材の開発及び開発した耐火材を用いたルツボ部材製造設備導入等**を追加して研究を加速した。
- (2)平成18年度に、金属の高純度化に係る**水素精錬技術について成果**が得られたため、水素付加装置を前倒して導入して研究を推進した。
- (3)平成19年度に、低コスト・量産化製造技術の研究開発において、溶製中の超高純度金属材料の汚染物質である元素をppmレベルで迅速に分析する**発光分光分析に関する技術を開発**したので、大型溶解炉に隣接して設置することとし、研究開発の効率化を図った。
- (4)実用化への橋渡しができるよう、研究期間を1年延長し、**有望材料である高温高強度部材のクリープ強度や溶接性**等の重要技術の見極めを実施した。
- (5)産業化する際に重要となる標準化に端緒を開いて早期実用化に貢献できるよう、平成22年度に**認証用標準物質を作製**し、国内外での登録の準備を進めた。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 17

## II. 研究開発マネジメントについて 4. 中間評価結果への対応

事業原簿16-17頁

### 中間評価の概要と対応の状況 (その1)

中間評価結果 (抜粋)	中間評価前の状況	中間評価を受けての対応
複数の大型プロジェクト、ならびに先導研究の成果を踏まえて開始されたにもかかわらず、その開発対象部材が適切に絞り込めていないとしたい。	開発対象部材 ①超高純度Fe-Cr系合金:伝熱管、蒸気配管等の発電用大型重要構造部材 ②超高純度Cr-Fe系合金:ガスタービン動翼等の小型高付加価値部材	・現時点での実用化の見通しが少ないガスタービンを開発対象から外す ・プロジェクト期間の終了時に実機に適用できる目処をたてるものと、2015年頃に実用化が期待するものに絞り込む
研究開発目標には数値目標が定められていないなど明確さを欠きらいがある。	最終目標 1-①:略 1-②:開発材が現用材(ステンレス鋼等)以上の優れた材料特性(耐環境性等)を有することを確認する。 2-①:各種部品製造技術ごとに対象とする製品の試作及び加工性が現用材と同等以上であることを確認する。 など	・開発対象部材を絞り込み、それぞれの材料に対して必要となる各元素濃度レベル等を最終目標として提示する。 (例)実用化検討部材 ・現用材SUS316の10倍以上の硫酸露点腐食に対する耐食性(溶接部を含む) ・室温耐力200MPa以上 ・現用材SUS316と同程度の薄板加工性及び溶接性の確認 ・想定コストは1万円/kg以下(量産時)

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 18

II. 研究開発マネジメントについて 4. 中間評価結果への対応

事業原簿16-17頁

中間評価の概要と対応の状況 (その2)

中間評価結果 (抜粋)	中間評価前の状況	中間評価を受けての対応
プロジェクトリーダーと研究推進リーダーを一本化して、研究指導體制を明確にすることが望ましい。	プロジェクトリーダー 研究組合：山本技術部長 研究推進リーダー 東北大学：安彦客員教授	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究推進リーダーを廃止し、プロジェクトの責任者をプロジェクトリーダーへと一本化する。</li> <li>【使う技術】の研究開発を強化するため平成21年1月以降は複数のサブプロジェクトリーダーを設置</li> </ul>
成果の学会発表が全く成されていないことも懸念事項である。	学会発表：1件(金属学会) 特許出願：1件 新聞掲載：1件	学会発表：7件(国際会議開催2009年) (別に、震災の影響での中止1件) 特許出願：9件 新聞等掲載：10件以上

II. 研究開発マネジメントについて 4. 中間評価結果への対応

事業原簿16-17頁

中間評価の概要と対応の状況 (その2)

中間評価結果 (抜粋)	中間評価前の状況	中間評価を受けての対応
プロジェクトリーダーと研究推進リーダーを一本化して、研究指導体制を明確にすることが望ましい。	プロジェクトリーダー 研究組合：山本技術部長 研究推進リーダー 東北大学：安彦客員教授	・研究推進リーダーを廃止し、プロジェクトの責任者をプロジェクトリーダーへと一本化する。 ・【使う技術】の研究開発を強化するため平成21年1月以降は複数のサブプロジェクトリーダーを設置
成果の学会発表が全く成されていないことも懸念事項である。	学会発表：1件(金属学会) 特許出願：1件 新聞掲載：1件	学会発表：7件(国際会議開催2009年) (別に、震災の影響での中止1件) 特許出願：9件 新聞等掲載：10件以上

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 19

III. 研究開発成果について 1. 目標達成状況

事業原簿19-25頁

開発項目	目標	達成状況	評価
超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発	市販カルシアルツボに比較し、溶湯の純度を下げない高耐久ルツボの開発	・市販CaOルツボの3倍以上の耐久性(溶解回数10回)検証済み。 ・目標コスト40万円/100kg用1個に対し、量産段階で達成の見通し。 ・大型量産化要素技術として目地材技術開発し、溶解試験により実証済み。	○
	低コスト原料からC, Si, Mn, P, S, N, Oの不純物総量50ppmレベル以下の超高純度金属材料を得る100kg級溶解炉等の開発	・溶解量100kg級の高清浄雰囲気溶解炉を設計・設置。 ・低コスト原料を直接溶製の場合、不純物総量は50ppmを超える結果となった。 ・4N電解鉄からAl脱酸で不純物総量47ppmの100kg級合金インゴットを溶製。 ・検出下限が従来比1~2桁高精度の迅速分析技術および分析装置を開発。	○
開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価	不純物濃度と各種特性の関係の明確化	・不純物濃度極小化により延性・耐食性増、溶接性向上を確認した。 ・合金の場合は純度効果が見え難いが、靱性、耐力向上が期待できる。	○
	新材料による部材開発(カテゴリⅠ、Ⅱ、Ⅲ材に分けて時間軸を考慮しつつ開発)	・カテゴリⅠ材では耐食性が6.7倍に向上し、概ね目標を達成した。 ・同Ⅱ材では耐食性目標5倍に対して3.3倍を得た。 ・同Ⅲ材では700°C・10万時間クリープ破断強度70MPaの目標を達成見通し。 ・煙突ライナー材を実プラント環境下で実用性評価試験。現用材と差異なし。	○ ~△
	対象システムのメリットが現用材システムより優れることの確認	・開発材を各種プラント・システムの機器に適用する場合を試算。 ボイラー過熱器管適用の例では、現用比30億円/25年間の保守費用軽減。	○

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 20

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

成果概要 ①-1 高耐久ルツボ・耐火材の開発

事業原簿26-30頁

開発の狙い

超高純度金属材料の産業利用には

①汚染が少ない溶解炉、②低コスト・量産化製造技術 が必要  
 研究室レベルのCC炉を用いた溶解には量的・コスト的制約があり実用的ではない

⇒従って、**耐火材を用いた実用化システム**の開発が必要との考えのもと

・最も溶鋼を汚染しにくいと考えられるCaO材を適用

CaO材は耐火材に用いられている材料の中で化学的に最も安定。

CaO材はTi合金溶製に用いられる唯一の材料

・CaOには水和性等、耐久性の面で課題あり

⇒実用システムに適した**高耐久ルツボ・耐火材の開発**  
 を研究テーマの一つとした。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 21

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

成果概要 ①-1 高耐久ルツボ・耐火材の開発

事業原簿26-30頁

開発の結果

従来CaO材  
 ・水和  
 ・溶鋼差込

(各種要素技術開発)

開発要素技術	適用効果
(1) CaO原料の配合粒度最適化による空隙制御	溶鋼差込の抑制
(2) Alキレート添加によるCaO原料粒同志の焼結性改善、および原料粒の被覆	焼結体強度向上 水和性改善
(3) Zrキレート添加による高融点のCaO-ZrO <sub>2</sub> 化合物の形成	ルツボ内面被覆により溶鋼に対する耐性が向上(溶損防止)
(4) 成型機および成型技術開発による成型体密度およびその不均質度の改善	亀裂や溶鋼差込の抑制

高耐久性実証

新規開発した100kg級URC (Ultra Refined Ceramics) ルツボは、溶鋼汚染が極めて少なく、かつ、耐久性が従来の市販CaOルツボの3倍以上(溶解回数)であることを実証



図 URCルツボ内面(溶解10回後)

大型炉に目途

URC技術をタンディッシュ等の耐火材にも適用  
 また、目地材技術開発とその実証試験により、  
 レンガ積み大型炉(低コスト・量産化)に目途

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 22

### Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

#### 成果概要 ①-2 新規精練技術開発

事業原簿30-33頁

#### 開発の狙い／開発の進め方

- ◆本プロジェクトでは材料の評価に主眼が置かれるため、多段にわたるすべての精練段階を追うことは避け、既存技術での不純物除去システムをフロントエンドとして、得られた材料に対して脱ガスを中心とした2次的な不純物除去のシステムを念頭に、これらの精練システム要素に関する技術課題を明らかにして研究開発を行うこととした。
- ◆この検討においては、超高純度金属材料溶製のための高真空誘導溶解炉の仕様を上記精練システムの一翼を担わせているものの、その中心は溶解での汚染が極少化されながらも、100kg級溶解という大型化への一歩を踏み出す役割を課している。
- ◆2次的な脱ガス中心の精練要素として、水素精練、真空精練、アルミニウム精練等について汎用真空誘導溶解炉(VIM炉)も駆使して研究開発を行った。
- ◆なお、本来ならば、新開発の高真空誘導溶解炉に水素精練の更に進めたシステム概念を敷設しているが、操業安全上の制約等から真空+水素溶解実験には至っていない。
- ◆これらの制約の上で、精練技術要素について基礎的な試験を行い、全体システム概念構築に資することとした。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 23

### Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

#### 成果概要 ①-2 新規精練技術開発

事業原簿30-33頁

#### 開発の結果

##### 水素精練基礎的検討

①3kgコールドクルーシブル炉(CC炉)による水素精練

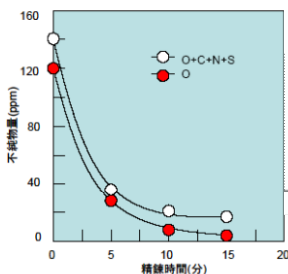


図 水素吹きに伴う鉄中不純物の経時変化(3kgCC炉)

耐火材を用いない高潔浄状態での溶解で水素精練が有効であることを確認

②20kg真空溶解炉(VIM炉)による水素精練

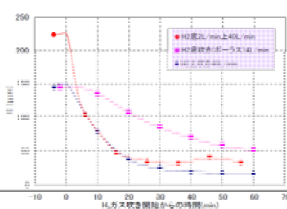


図 水素吹きに伴う鉄中不純物の経時変化 (20kgVIM炉)

耐火材を用いた溶解でも水素精練が有効であることを確認

各種の精練技術が超高純度金属材料溶製に有効であることを確認した上で、既存技術による不純物除去システムをフロントエンドとして高真空誘導溶解炉を用いた溶解により不純物総量の目標値を達成できることを実証した。

##### 真空精練

・平衡酸素分圧による直接的な脱酸効果を得るにはいたらず。

##### Al精練

表 溶製したカテゴリーII材の不純物分析値  
溶解No: 8K02  
主要組成: Fe-30Cr-30Ni-10Mo-2Al

不純物 (ppm)							
C	N	S	P	Si	Mn	O	計
12	6	1	<3	13	2	10	<47

主要不純物総量50ppm以下

##### その他

・若干ながらルツボ材CaOによる脱硫効果が認められる。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 24

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

成果概要 ①-3 高真空誘導溶解炉の開発

事業原簿33-37頁

開発の狙い

本高真空誘導溶解炉は溶解要素が溶解試験にどのような影響を及ぼすかを見極め、今後の大型化へのデータとすることも念頭に置き、システムからの汚染影響を検証する性能として炉内真空度を100kg級高真空誘導溶解炉としては画期的な高真空(10<sup>-6</sup>Paレベルの高真空)が得られるように発想。



図 高真空誘導溶解炉の概観

高真空誘導溶解炉／開発の結果

表 高真空誘導溶解炉の主な仕様

仕様項目	仕様値および条件
①溶解能力	1)電解鉄の溶落時間:100kg/60分以内 2)溶解温度:最高1900℃ 3)溶解雰囲気:真空、H <sub>2</sub> 、Ar等
②炉容量	常用100kg(溶湯比重6.9として換算)
③真空槽の構造	二重構造であり、間に100℃の熱湯を循環させることが可能(ベイク機能)
④炉側出力電気定格(インバータ出力)	電力400kW、電圧600V、周波数500Hz、相数1φ
⑤溶解金属の処理	鑄型への注湯は覗き窓より炉内を監視しながら電動にて炉体を傾動させる方式
⑥真空性能	真空槽到達圧力 10 <sup>-8</sup> Torr台(常温、炉体・鑄型無し) 10 <sup>-6</sup> Torr台(常温、炉体有り・鑄型無し) 排気時間760Torrから5×10 <sup>-4</sup> Torrまで60分以内

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 25

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

成果概要 ①-4 認証用標準物質の作製

事業原簿37-38頁

狙い

(国際標準・規格化に用いる超高純度鉄の溶製)  
超高純度鉄を用いた国際ラウンドロビン試験によって鉄本来の性質を調べ、その実用化を図る国際規格化を進める。

背景

東北大学金属材料研究所で溶製された超高純度鉄は64元素の極微量定量により純度:99.9996%、不確かさ:±0.0003%の国際一次標準鉄として、2011年1月6日、我が国製品評価技術基盤機構(NITE)のRMInfo、独国連邦材料試験研究所(BAM)のCOMARに登録された。

開発結果



図 超高純度鉄の8kgインゴット

国際一次標準に認証された東北大学金属材料研究所製の超高純度鉄と同じ方法で溶製



図 超高純度鉄の80kgインゴット

本プロジェクトで開発した100kg級の超高純度金属溶解炉とレンガルツボを用い脱酸剤を無添加で溶製

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 26

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

成果概要 ②-1 超高純度金属材料の開発 開発材の分類

事業原簿39-40頁

◆開発材の分類に当たり、実用化までの時間軸として3段階を考慮し、下記の通り分類した。なお、材料の開発は一朝一夕というわけではなく、下記に設定した時間軸は、その頃に目途付けをしようというものであるため、まずは本プロジェクトで開発材料の方向性を探ることに重点を置いた。

<p>① <b>カテゴリⅠ：実用化検討部材</b> (プロジェクト期間終了時に実機に適用できる目途をたてるもの)</p>	<p>火力発電プラントの煙突ライナー・煙道に適用することを前提とした材料であり、候補材としては、コストを意識し高クロムではない(18~25Cr)鉄-クロム合金とした。具体的にはFe-20Cr系 (Fe-20Cr-5Mo鋼やFe-20Cr-3Mo-2W鋼など)を候補材とした。比較対象材：SUS316、SUS316L</p>
<p>② <b>カテゴリⅡ：中期的開発部材</b> (2015年頃に実用化が期待できるもの)</p>	<p>廃棄物発電プラントの過熱器管に適用することを前提とした材料であり、候補材としては、コストを意識し高クロムではなく(18~30Cr)、耐腐食性を考慮し、鉄-クロム-ニッケル合金とした。具体的にはFe-20~30Cr系又はFe-Cr-Ni系 (Fe-30Cr-30Ni-10Mo-2Al鋼など)を候補材とした。比較対象材：SUS310</p>
<p>③ <b>カテゴリⅢ：長期的開発部材</b> (2030年頃に実用化が期待できるもの)</p>	<p>先進超々火力発電プラントの過熱器管に適用することを前提とした材料であり、候補材としては、コストを意識し高クロム、高ニッケルではなく(18Cr以下、20Ni以下)、溶解精錬性、加工性、溶接性を考慮し、かつ、マトリックスを超高純度化した上で、析出物を微細析出させることで高強度を狙った鉄-クロム-ニッケル合金とした。具体的にはFe-18Cr-20Ni-2Mo-2W系鋼を候補材とした。本材料は東北大学で開発されたものでT6材と称している。比較対象材：火SUS304J1HTB</p>

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 27

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

成果概要 ②-1 超高純度金属材料の開発

事業原簿40-45頁

カテゴリⅠ (耐環境部材) 狙い

プロジェクト期間終了時に実機に適用できる目途を立てるものとして、耐環境部材に使える見込みが考えられるFe-20Cr系超高純度合金について、特性評価を行う。

結果

機械的特性

- 引張試験(室温)
  - ・0.2%耐力371MPa
  - ・引張強さ517MPa
  - ・伸び32.5%
  - ・絞り78.5%

シャルピー衝撃試験

- ・室温で377Jと優れた靱性
- ・高純度化効果；不純物濃度が高くなると室温でのシャルピー吸収エネルギーは顕著に低下し、高純度化の効果があることが確認された。

耐食性

硫酸浸漬腐食で濃度と温度を変えて試験した結果、SUS316の約7倍の耐食性を確認した。

溶接性



図 TIG溶接した高純度材

- ・PT検査で割れ、亀裂等見られず。
- ・汎用材製造技術と比較して問題なし。

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 28

### Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

#### 成果概要 ②-1 超高純度金属材料の開発

事業原簿45-46頁

**カテゴリーⅡ**  
**(中期強度部材)**

**狙い**

2015年頃に実用化が期待できるものとして、廃棄物発電プラントの過熱器管に使える見込みが考えられるFe-20~30Cr系超高純度合金あるいは Fe-30Cr-30Ni系超高純度合金について、特性評価を行う。

**結果**

**耐食性**

図 塩塗布試験における腐食減量(550°C・100時間)

材料	符号	番号	初期寸法(mm)			表面積 (cm <sup>2</sup> )		重量		底食減量		SUS310に対する耐食性		減肉量 (μm)
			+	≡	↓	試験前	試験後	(g)	mm/cm <sup>2</sup>	平均	結果	目標		
高純度30Cr-30Ni-10Mo-2Al合金	8F02	1	2.915	14.938	14.925	6.20	4.9960	4.7661	0.2119	34.2	36.7	3.3	5以上	45
		2	2.947	14.917	14.924	6.21	5.0694	—	—	—				
		3	2.962	14.912	14.938	6.22	5.0768	4.8835	0.2433	39.1				
普通純度30Cr-30Ni-10Mo-2Al合金	8F08	1	2.943	14.925	14.858	6.19	5.0497	4.9051	0.1446	23.4	23.0	5.2	—	29 (129)
		2	2.949	14.944	14.937	6.19	5.0693	—	—	—				
		3	2.946	14.717	14.892	6.13	4.9965	4.9596	0.1389	22.7				
火SUS310J1	HF0C	1	2.930	14.951	14.938	6.22	5.0465	4.1553	0.8912	143.3	120.8	—	—	152
		2	2.934	14.928	14.822	6.17	5.0207	—	—	—				
		3	2.969	14.830	14.940	6.20	5.2680	4.6570	0.6090	98.2				

塩塗布試験により腐食減量と減肉厚さを測定、耐食性はSUS310の**3.3倍**であることを確認した。

**製造性**



図 鍛造加工試験(据え込み) 図 パック圧延

・加工性に課題があることがわかった。(軟鋼材でパッキングして圧延しても成型性不十分)  
・マイクロ組織は二相組織であり、鍛造割れの要因となった可能性が考えられる。

### Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

#### 成果概要 ②-1 超高純度金属材料の開発

事業原簿47-51頁

**カテゴリーⅢ**  
**(長期強度部材)**

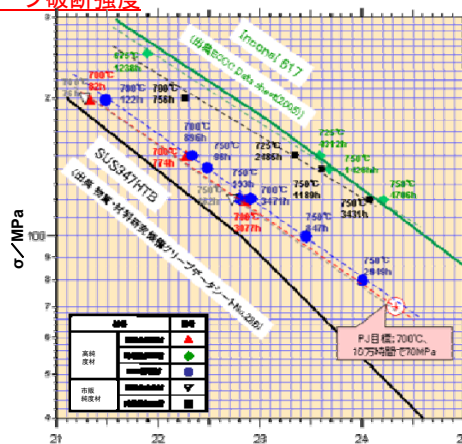
**クリープ破断強度**

**狙い**

2030年頃に実用化が期待できるものとして、先進超々火力プラントの過熱器管に使える見込みが考えられるFe-18Cr-20Ni系超高純度合金について、特性評価を行う

**結果**

- ・ 700°C10万時間のクリープ破断強度は、母材で100MPa以上、溶接熱影響部(HAZ)で70MPa以上(PJ目標70MPa以上をクリア)
- ・ 高純度材のクリープ破断強度は市販純度材と同等以上の傾向にある



$$PLM = (273 + T) (20 + \log t_r) / 1000$$

図 クリープ破断試験結果



Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

事業原簿51-53頁

成果概要 ②-1 超高純度金属材料の開発

純度効果、不純物添加効果

(1) 純度効果

- 高純度化により靱性、耐食性が向上
- 合金の場合、純度効果が現れにくい

(2) 不純物添加効果

- 純度効果に比べ材料特性への影響が窺える

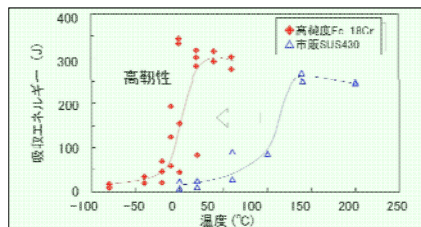


図 純度効果

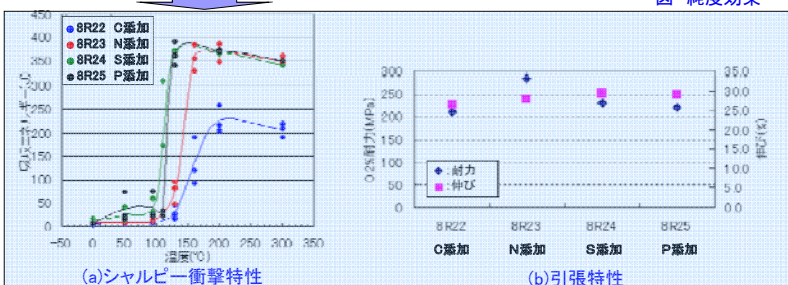


図 不純物効果

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 31

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

事業原簿54-57頁

成果概要 ②-2 部材製造技術開発

開発の狙い

超高純度金属材料による製品をどのような機器要素として使えるかを検討するため、超高純度合金を溶製し、素材、部材、更には部品試作を行った。

対象としては、社会的ニーズの大きい発電プラント用機器を想定し、部品としては複雑形状のものが製造できるかについて検討した。

開発の成果

部材製造技術

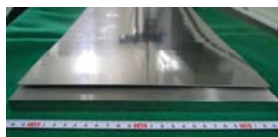


図 実機模擬ラインで試作した超高純度Fe-18Cr板材(厚板1mm及び25mm厚板)



図 試作したシームレスチューブ(高周波曲げ後の外観)



図 試作した型鍛造翼

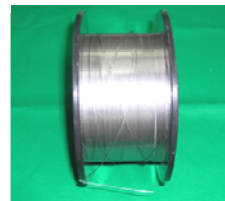


図 φ1mmワイヤ

事後評価分科会資料(6月21日) 資料6 32

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

事業原簿54-57頁

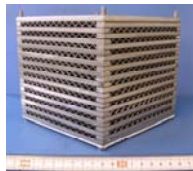
成果概要 ②-2 部材製造技術開発

開発の成果

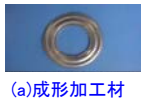
部品製造技術



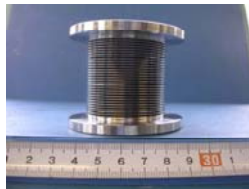
(a)波板



(b)溶接組立て後  
図 熱交換器(Fe-20Cr-3Mo-2W)



(a)成形加工材



(b)極薄圧延板材(厚さ0.2mm) (c)レーザ溶接組立て後  
図 ペローズ(Fe-25Cr-3Al)

溶接技術



図 狭開先TIG溶接(アルゴンガス雰囲気中)



図 丸棒突合せ溶接継手TIG溶接(アルゴンガス雰囲気中)

Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

事業原簿58-63頁

成果概要 ②-3 実プラントによる実用性評価試験

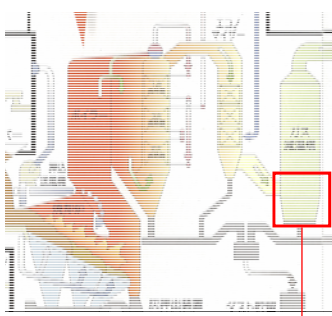


図 試験片取付け位置



図 取付け治具の外観

No.1: 20Cr-5Mo-Fe  
No.2: 20Cr-3Mo-2W-Fe  
No.3: SUS316L



図 第1回試験片取出し後の状況

供試材	肉厚(mm)		
	初期	第1回取出し時	
		83日後	減少量
8K01	1.498	1.496	0.002
7K07	1.495	1.494	0.001
SUS316L	1.487	1.486	0.001

達成状況

- ・火力発電プラントの煙突ライナー材料について実環境下で実用性評価試験を実施。
- ・分析結果より、耐環境性(腐食特性)は、20Cr-5Mo-Fe、20Cr-3Mo-2W-Fe、SUS316とで顕著な差異は見られない。

### Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

#### 成果概要 ②-4 システムメリットの試算

事業原簿64-69頁

#### 原料コストの見通し

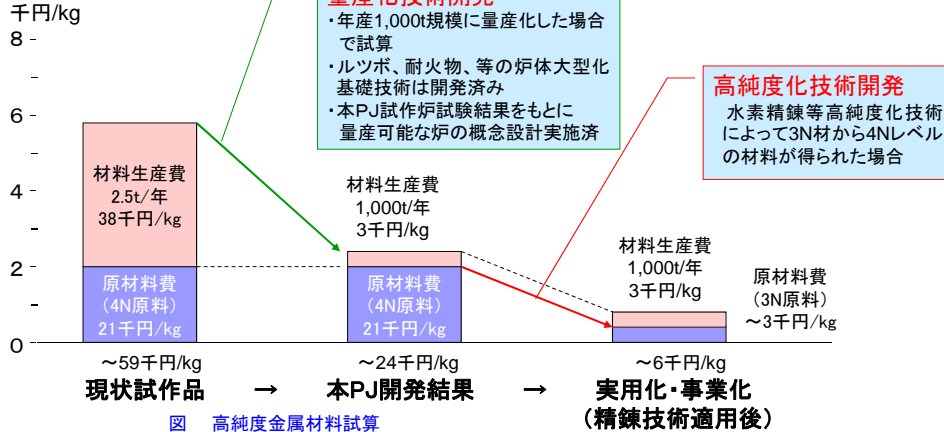


図 高純度金属材料試算

- ・材料生産費は想定生産規模で試算した下記諸費用の積算値  
 ①設備焼却費、②電気代、③労務費、④加工費、⑤修繕費等
- ・原材料費はカテゴリーⅢ合金(T6相当)で試算

### Ⅲ. 研究開発成果について 2. 研究開発項目毎の成果

#### 成果概要 ②-4 システムメリットの試算

事業原簿64-69頁

#### (1) ボイラ過熱管

高効率廃棄物発電ボイラ過熱器(SH)の構成		従来	超高純度金属材料採用の場合
一次SH(~370°C)	STBA22	STBA22	STBA22
二次SH(~450°C)	SUS310系	SUS310系	SUS310系
三次SH(~500°C)	Alloy625	Alloy625	超高純度金属材料

Alloy625と超高純度金属材料の比較		
	Alloy625	超高純度金属材料
耐食性 (廃棄物燃焼環境)	1mm/年	0.5mm/年
材料コスト(円/kg)	6000~8000円/kg	Alloy625と同等

メンテナンス費用の低減が可能となり、廃棄物発電プラントの寿命25年間のライフサイクルコストで、3,000百万円低減が可能

#### (2) ボイラバーナ部品

**現状**  
 ・火炎に曝されるバーナー部品 (ノズル先端、ディフューザー等)  
 →高温酸化、脆化、熱伸び差による変形、亀裂による損傷大  
 ・材質: 40Cr-30Ni, 50Cr-50Ni等  
 ・損傷の激しい箇所は定検(2年)毎に交換

**経済的効果試算の仮定**  
 ・従来材(40Cr-30Ni)部品の耐用年数: 2年  
 ・超高純度Fe-Cr-Al合金の耐用年数: 10年  
 ・部品としての材料コスト  
 40Cr-30Ni: 3000円/kg  
 超高純度金属材料: 従来材の2倍

20年間のメンテナンスコストは98百万円削減可能

#### (3) エアヒータエレメント

**現状**  
 ・材料: 炭素鋼  
 ・バスケット費用: 数十万円/バスケット

**経済的効果試算の仮定**  
 ・エアヒータ低温部のみ対象(バスケット数32個、バスケット重量500kg/個)、総重量16ton  
 ・従来材は4年に1度交換、超高純度金属材料は交換の必要なしと仮定  
 ・エレメントに使用される波板コスト: 従来材10に対して超高純度50と仮定

現状、高コストな高級材料を使用してもある程度の頻度での交換を余儀なくされている部材への超高純度金属材料の適用で、メンテナンス費用削減の効果が認められる

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 研究発表・講演・論文発表

事業原簿72-73頁

##### 1) 国内・国際会議・講演会等発表

- ①平成19年 3月 「日本金属学会春季大会」(高純度25Cr-3Al-Fe合金製耐熱ペローズの試作とその特性評価)
- ②平成19年 7月 “International Conference on Ultra-High Purity Base Metals and Model Alloys”
- ③平成20年11月 「第1回超高純度金属材料技術研究組合シンポジウム」
- ④平成21年12月 “The 15<sup>th</sup> International Conference on Ultrahigh Purity Metals”及び「国際講演会」
- ⑤平成23年 3月 「日本金属学会春季大会」(予定→東日本大震災により中止)
- ⑥平成23年 6月 「発電プラント用超高純度金属材料の開発プロジェクト研究成果報告会」

##### 2) 学会誌等の発表

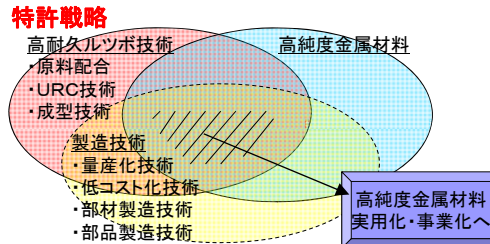
- ①「日経ものづくり」(日経BP社発行)2006年3月号
- ②「工業材料」(日刊工業新聞社発行)2008年1月号

#### 特許

- ①平成19年度 3件 「高耐久ルツボ関連」
- ②平成20年度 4件 「高純度鉄合金関連」
- ③平成21年度 2件 「高耐久ルツボ関連」

#### 特記事項

- ①新聞掲載 : 日刊工業新聞、日経産業新聞、日本経済新聞、毎日新聞、朝日新聞等に関連記事
- ②TV放映 : NHK「おはよう日本」、「サイエンスゼロ」、「時論公論」等にて関連ニュース放映
- ③展示会 : 「鉄-137億年の宇宙誌」に超高純度鉄・パネル等展示



### Ⅳ. 実用化、事業化の見通しについて 1. 実用化、事業化の見通し

事業原簿6971頁

#### 「作る技術」の実用化

- 新規開発URCルツボは実際の溶解試験で高耐久性実証済み。100kg級では実用レベル。トン級を目指す大型レンガ積み構造も耐久性等見通しは明るい。
- 耐火物ルツボを用いた超高純度金属材料溶製において既存精錬技術は適合性を有している。「真空+水素」精錬は未実証ながら実用性も示唆。
- 新型溶解炉設計・製作・実証を通じ、100kg級高真空誘導溶解炉は実用レベル。トン級溶解炉の設計概念を構築。
- 超高純度金属材料溶製時の迅速分析技術は実用レベルに達している。
- CC炉で超高純度鉄の標準物質を溶製済み。

IV. 実用化、事業化の見通しについて 1. 実用化、事業化の見通し

事業原簿69-71頁

**「使う技術」の実用化 超高純度金属材料の特長を活かした用途**

- 超高純度金属部材・部品製造に係る加工技術は実証済み、用途に応じ適用
- 靱性、耐食性に優れた特長を活かし、耐環境部材として比較的早期に実用化
- 課題を克服しつつ特長を活かして発電プラント用部材への適用探求(下図「A」)
- 広範囲な用途の性質を加味し、原子力、水素、運輸部門等広範囲な適用探求(下図「B」)

	~ H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31 ~	
本 研 究		A 発電プラント適用に向けた開発研究					実機適用設計・計画検討				
		B 原子力プラントへの適用性評価					原子力プラント適用化開発研究				実 用 化
		B 水素関連、運輸部門等適用性評価					運輸等適用化開発研究				

IV. 実用化、事業化の見通しについて 2. 成果の普及

事業原簿69-71頁

**高耐久URCルツボ**

不純物のピックアップが少なく、高耐久性。(コストパフォーマンスに優れる)  
 →鉄系合金ルツボにとどまらず、Ti合金・Mg合金等の溶解用ルツボ、真空蒸着用ルツボ、鋳型材、ノズル、介在物除去フィルターにも転用可能

**迅速分析技術**

本PJで開発した分析技術は従来よりも格段に高い分析精度を有する。  
 →迅速分析でありながら従来よりも1~2桁高い分析精度を有するようになったことから、分析元素によっては分析コストの大幅な低減につなげることができる。

**高純度合金化**

本PJで明確化した不純物効果を既存の合金材料に転用することで効率的な材料開発が期待できる。  
 (例) 合金組成を変えることなく高純度化することで、耐食性や靱性を付与。