

「発電プラント用超高純度金属材料の開発」

事業原簿（公開）

担当部

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
エネルギー対策推進部

―目次―

概要

I. 事業の位置付け・必要性について	
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	1
1. 1 NEDO が関与することの意義	1
1. 2 実施の効果	2
2. 事業の背景・目的・位置付け	3
2. 1 事業の背景	3
2. 2 事業の目的	4
2. 3 事業の位置付け	5
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	6
2. 事業の計画内容	8
2. 1 研究開発の内容	8
2. 2 研究開発期間	10
2. 3 研究開発予算	10
2. 4 研究開発の実施体制	11
2. 5 研究開発の運営管理	13
3. 情勢変化への対応	15
3. 1 情勢変化への対応	15
3. 2 研究開発マネジメント上の工夫	15
4. 中間評価結果への対応	16
5. 評価に関する事項	18
III. 研究開発成果について	
1. 事業全体の成果	19
2. 研究開発項目毎の成果	26
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	69
2. 成果状況一覧	72
3. その他特記事項	73

プロジェクト基本計画

エネルギーイノベーションプログラム（抜粋）

ナノテク・部材イノベーションプログラム（抜粋）

NEDO POST3 掲載資料（事前評価書、プロジェクト概要）

概要

		作成日	平成 23 年 6 月 13 日
プログラム名	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		
プロジェクト名	発電プラント用超高純度金属材料の開発	プロジェクト番号	P05005
事業担当推進部・担当者	エネルギー対策推進部 主査 楠瀬・関口		
0. 事業の概要	<p>従来の材料より遥かに優れた特性（耐環境性、靱性、加工性等）を有する超高純度金属材料を発電プラント等で利用するため、超高純度金属材料の優れた特性を維持しながら、低コスト・量産化すべく、(1)超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術開発（①高耐久ルツボ・耐火材の開発、②新規精錬技術開発、③高真空誘導溶解炉の開発、④認証用標準物質の作製）、(2)開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価（①超高純度金属材料の開発、②部材製造技術開発、③実プラントによる実用性評価試験、④システムメリットの試算）を進める。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>金属材料は近年、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ため、さらに高度な特性を発現させることが必要である。具体的には、発電プラント等では、高温腐食や磨耗、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るほか、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（CO₂削減）や、部材交換頻度の減少等に伴う発電コスト軽減等が期待されている。</p> <p>一方、これまでの元素添加と熱処理による現行の金属材料開発手法等では金属材料の新たな特性を引き出し、飛躍的に向上させることは限界に近づいている。また、レアメタルの枯渇に対応するために希少金属の代替技術の開発が重要視されている。そこで、金属の超高純度化により、従来の材料より遥かに優れた特性（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」（平成 13 年度～18 年度）での成果を踏まえ、超高純度金属材料（超高純度 Fe-Cr 系合金等）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と考えられる。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>(1) 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発</p> <p>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。</p> <p>②低コスト原料から C, Si, Mn, P, S, N, O の不純物総量が 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及び精錬技術を開発する。</p> <p>(2) 開発材による部品製造技術の開発及び実用性評価</p> <p>①不純物濃度と各種特性の関係を明らかにする。</p> <p>②新材料による部材の開発と評価</p> <p>(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見通しを得るために、以下の目標を達成すること。</p> <p>○候補材料系：Fe-20Cr 系超高純度合金</p> <p>○目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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） <p>(b) 中期的開発部材（2015 年頃に実用化が期待できるもの）</p> <p>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。</p>		

		<p>○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</p> <p>○目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現用材である SUS310 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 ・350～400℃の温度域でのクリープ破断強度 100MPa 以上 ・現用材である SUS310 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） <p>(c)長期的開発部材（2030 年頃に実用化が期待できるもの）</p> <p>平成 22 年度においては、開発材料を 700℃級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> <p>○目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実用化段階の目標である 700℃、10 万時間におけるクリープ破断強度が 70MPa 以上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 万時間のクリープ破断強度が 70MPa 以上であること。 ・現用材である火 SUS304J1HTB と同程度の加工性と溶接性があること。 ・既存加工プロセスで製作が可能なこと。 <p>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。</p>						
事業の計画内容	<p>主な実施事項</p> <p>①低コスト・量産化製造技術開発</p> <p>①-1 高耐久ルツボ・耐火材の開発</p> <p>①-2 新規精錬技術開発</p> <p>①-3 高真空誘導溶解炉の開発</p> <p>①-4 認証用標準物質の作製</p> <p>②部品製造技術開発及び実用性評価</p> <p>②-1 超高純度金属材料の開発</p> <p>②-2 部材製造技術開発</p> <p>②-3 実プラントによる実用特性評価試験</p> <p>②-4 システムメリットの試算</p>	H17fy	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	<p>会計・勘定</p> <p>特別会計（電源）</p> <p>総予算額</p>	H17fy	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	総額
		199	922	400	413	250	90	2274
		199	922	400	413	250	90	2274
開発体制	<p>経産省担当原課</p> <p>プロジェクトリーダー (H22. 3. 20～ H23. 2. 28)</p> <p>(H20. 10. 1～ H22. 3. 19)</p>	<p>製造産業局非鉄金属課</p> <p>超高純度金属材料技術研究組合 技術部長 廣田 耕一</p> <p>超高純度金属材料技術研究組合 専務理事 菅原 彰</p>						

	<p>(H19. 4. 1～ H20. 9. 30) (H17. 7. 1～ H19. 3. 31)</p> <p>サブプロジェクト リーダー (H22. 3. 20～ H23. 2. 28)</p> <p>(H21. 1. 6～ H22. 3. 19)</p> <p>※所属・肩書は就任 当時（敬称略）</p>	<p>超高純度金属材料技術研究組合 技術部長 山本博一 超高純度金属材料技術研究組合 専務理事 齊藤正洋</p> <p>九州電力(株) 発電技術開発部 グループ長 村田憲司 九州電力(株) 総合研究所 グループ長 金谷章宏</p> <p>(株)日立製作所 日立研究所 主管研究員 児島慶享 (株)東芝 電力・社会システム技術センター 金属材料開発部 技術主幹 山田政之 三菱重工業(株) 技術本部 長崎研究所 技監・技師長 納富啓</p>	<p>委託先 共同実施先 再委託先(H21 年度 まで)</p> <p>超高純度金属材料技術研究組合 (東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、関西電 力(株)、九州電力(株)、三菱重工業(株)、(株)日本製鋼所、 (株)日立製作所、(株)東芝、西日本環境エネルギー(株)、 日新製鋼(株)(H19 年度まで)) 東北大学 JFE テクノリサーチ(株)</p>
<p>情勢変化への対応</p>		<ul style="list-style-type: none"> 平成 18 年度に、低コスト・量産化製造技術の研究開発において、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高純度耐火材料(URC:Ultra Refined Ceramics)を開発し、さらに製造方法を工夫することで従来の 10 倍以上の耐久性を達成できる可能性を確認できたので、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当初の計画に追加して実施した。 平成 18 年度に、低コスト・量産化製造技術の研究開発において、金属の高純度化に係る水素精錬技術について、東北大学のコールドクルーシブル炉、日本製鋼所の小型炉と段階を追って優れた成果が得られたため、水素付加装置を前倒しで導入して研究を推進した。 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。 委託先の一部企業から、産業化に向けてプロジェクト終了後も研究を継続する意向が示されたため、そこへの橋渡しができるように有望な候補材料である高温高強度部材について評価中のクリープ強度試験等の見極め等が行えるよう実施期間を 1 年延長し、プロジェクト成果の早期実用化を目指した。 産業化する際に重要となる標準化についても端緒を開いて早期実用化に貢献するよう、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行うこととした。 	
<p>中間評価結果への対応</p>		<p>平成 19 年度に中間評価を実施した。</p> <p>中間評価の結果を受けて企画調整部及び研究評価部と検討・協議を行い、委託先とも相談して、当初計画や実施体制の見直し等の対応計画を</p>	

	<p>作成し、超高純度金属材料技術委員会での審議も踏まえて変更した。代表的な対応内容を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・開発対象部材の絞込みと研究開発目標の明確化：基本計画を改訂し、2つの開発目標に絞りこんで具体的な目標値を設定した ・研究指導體制の明確化：プロジェクトリーダーと研究推進リーダーが存在していたものを、プロジェクトリーダーへと一本化した。 ・情報発信の強化、サンプル出荷等外部評価の充実：平成21年に国際会議を開催。更に、認証用標準物質を溶製し、海外機関での評価を実施し、認証登録準備中。
<p>評価に関する事項</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・中間評価：平成19年度に実施 ・事後評価：平成23年度 実施予定。
<p>III. 研究開発成果について</p>	<p>1. 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発</p> <p>(1) 高耐久ルツボ・耐火材の開発 従来 CaO ルツボの損傷状況調査結果から、新規 URC (Ultra Refined Ceramics) ルツボの試作及びそれを用いた溶解実験とその損傷状況の解析を行い、新規 URC ルツボ開発を進めた。この結果、溶解使用可能回数的大幅な増加など従来 CaO ルツボを凌駕する性能を有する URC ルツボを開発した。これらの結果、高耐久性 (溶解回数 10 回以上)、量産時コスト 100kg 級ルツボ 1 個当たり 40 万円の目標を達成した。更に、この結果を受けて、量産化に向けた大型ルツボの検討を行い、大型化に必要なレンガ構造について、先ず目地材の強度試験を実施し、良好な結果を得た。このため、続いて模擬的なレンガ積み構造モデルを作製し、実際に溶解を行って耐久性の見通しをつけた。</p> <p>(2) 新規精錬技術開発 従来の CaO ルツボを用いた 20kg 真空溶解炉により、電解鉄の水素上吹き溶解、底吹き溶解、上吹き+底吹き溶解することによる水素精錬実験、及び、比較として水冷銅ルツボを用いた超高真空コールドクルーシブル炉による電解鉄の水素上吹き溶解実験も実施した。この結果、水素ガス中溶解技術を開発し、鉄中の酸素量の低減に極めて有効であることを明らかにした。</p> <p>(3) 高真空誘導溶解炉の開発 上記 (1) (2) の開発結果を検証するために、100kg 溶解及びルツボ焼成が同じ一つの炉で可能な世界初の超清浄雰囲気誘導加熱式溶解精製装置 (高真空誘導溶解炉) を設計・製作し、本溶解精製装置の各種性能チェック・試験ルツボ焼成・試験溶解を行った。これらの試験溶解等を踏まえ、本高真空誘導溶解炉に適合する溶解手順・操作方法を確立し、各種超高純度金属を溶解し、C, Si, Mn, P, S, N, O の不純物総量が 50ppm レベル以下とする溶解を達成した。</p> <p>(4) 認証用標準物質の作製 東北大学所有のコールドクルーシブル炉を用いて超高純度鉄の溶製を行い、認証用標準物質を作製した。</p> <p>2. 開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価</p> <p>(1) 超高純度金属材料の開発</p> <p>① 超高純度 Fe-Cr 系又は Fe-Cr-Ni 系合金につき社会的ニーズを踏まえた用途と実用化までの時間軸を考慮し、3 種のカテゴリーに分類して合金開発を行った。</p> <p>(a) 実用化検討部材 (Fe-20Cr 系超高純度合金を溶製し試験を実施)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○硫酸露点腐食：SUS316 に比べ 7 倍程度の優れた耐食性を示し、目標をほぼ達成した。 ○室温耐力：室温での 0.2%耐力は 300MPa 以上あり、目標を達成した。 ○薄板加工性、溶接性：溶製した高純度合金の薄板加工性は良好で SUS316 より優れ、溶接性に関しても特に支障となる問題点はないことを確認した。 <p>(b) 中期的開発部材 (Fe-20~30Cr 系超高純度合金を溶製し試験を実施)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○耐食性：SUS310 の 3.3 倍程度の耐食性を有することを確認した。 ○室温耐力：室温 0.2%耐力は約 600MPa で目標達成。 <p>(c) 長期的開発部材 (Fe-Cr-Ni 系超高純度合金を溶製して試験を実施)</p>

	<p>○クリーブ破断強度：最終年度に各種のまま材、加工材試験片の 5000 時間までのクリーブ破断試験を実施し、得られたデータを用いてラーソンミラーパラメータ法による外挿を行い、実用化段階の目標である 700℃、10⁵ 時間におけるクリーブ破断強度が 70MPa 以上あることを見通すことができた。</p> <p>②不純物濃度の影響については、不純物濃度を極少化していくことにより、金属の延性、耐食性が増し、溶接性の向上も認められる。この特性は合金の場合、合金元素間の結合等の影響が不純物濃度差より大きいため、不純物濃度による材料特性の有意差は見えにくいですが、シャルピー衝撃値や耐力向上等に傾向が伺えることがわかった。</p> <p>(2) 部材製造技術の開発</p> <p>①ターゲット選定のための部材試作と評価試験 従来の超高純度金属原料（高コスト原料）を用いて試作した発電プラント用部材について、特性を市販材料を用いた部材と比較し、以下の結果を得た。</p> <p>○超高純度 Fe-25Cr 系合金は耐酸化性と成形性が良好であり、薄板部材（例えば、耐熱ペローズ、熱交換器等）として有望である。</p> <p>○ペローズ試料の 1000℃、1000 時間の大気酸化試験の結果、Fe-25Cr 系合金製ペローズの耐久性は市販ステンレス鋼よりも著しく優れており、試験後も伸縮性を維持した。</p> <p>②部材製造技術の開発 開発した高真空誘導溶解炉を用いて溶製した Fe-Cr 系超高純度金属の発電プラント用部材製造に必要な、鍛造、圧延、製管等の素材加工技術及び溶接技術を検討し、以下の結果を得た。</p> <p>○Fe-12～30Cr 系超高純度合金で厚さ 1～25mm の板材、シームレスチューブ及び型鍛造翼等の発電プラント用部材が製造可能なことを確認した。</p> <p>○試作した超高純度 Fe-18Cr 合金の靱性は、市販 SUS430 より著しく優れることを確認した。</p> <p>○不純物元素の混入が少ない Fe-18Cr 系の TIG 溶加棒、ワイヤの製造技術並びに TIG 溶接技術を開発した。</p> <p>(3) 実プラントによる実用性評価試験 耐環境部材（煙突ライナー材等）を廃棄物発電プラントの運転環境下において実証調査した。曝露試験後の観察結果では高純度 Fe-20Cr-5Mo 鋼等の耐食性は比較材の SUS316L 材と同等であった。</p> <p>(4) システムメリットの試算 開発材をボイラー過熱器管に用いたケースを想定し、耐食性に優れるメリットを生かしてメンテナンス回数に着目してシステムメリットを試算した。その結果、保守費用が 30 億円/25 年軽減される等システムメリットが見込まれるケースがあることを明らかにした。</p>
投稿論文	「査読付き」0 件、「その他」7 件（国際会議等）
特許	「出願済」9 件、「登録」0 件、「実施」0 件
その他の外部発表（プレス発表等）	<p>[プレス発表] 10 件（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）</p> <p>[メディア報道] 1 件（NHK「サイエンス ZERO」平成 21 年 10 月 31 日）</p> <p>[展示会]「鉄展—137 億年の宇宙誌」（平成 21 年 7 月 24 日～10 月 31 日：東京大学総合研究博物館）</p>
IV. 実用化、事業化の見通しについて	<p>(1) 実用化見通し 本プロジェクトにおいて、超高純度金属材料を用いたシステムで発電効率向上、メンテナンス費用削減等のメリットが期待できる可能性を明らかにした。また、材料特性からは、耐食性などの特定の機能に関して現用材に比して 1 桁近くのパフォーマンス向上が見込めることが明らかになっている。これらのことから、本プロジェクトの実施により、超高純度金属材料の優れた特性を発揮できる部分についての実用化見通しは得られた。また、材料によっては本プロジェクトを通じて摘出された課題を克服する研究開発を続けることで実用化への見通しが得られることも期待できる。</p>

	<p>また、本プロジェクトで開発し、実際に溶解試験においても相当回数使用した新規 URC ルツボは既に実用レベルにあると判断する。</p> <p>(2) 事業化について</p> <p>本研究開発の委託先である超高純度金属材料技術研究組合の参加企業には、ユーザとなる電力各社（東北電力、東京電力、中部電力、関西電力、九州電力等）とメーカである重電各社（日立製作所、東芝、三菱重工業）並びに素材メーカ（日本製鋼所）等が参加しており、これらの企業の継続的な研究を経て事業化の可能性は高いと考えられる。</p> <p>また、本研究開発成果の発電プラント以外への適用として、超高純度金属材料が粒界脆化特性に優れていることに着目すると、将来の水素社会に向けた水素関連機器への適用が期待できる他、超高純度化により高強度化が達成できれば 船舶等の運輸部門への適用も期待できる。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 17 年 3 月制定。
	変更履歴	<p>平成 18 年 2 月、プロジェクトリーダーの設置に伴い、研究開発の実施体制を、研究開発の具体的内容追加により研究開発計画とスケジュールを変更</p> <p>平成 18 年 3 月、プロジェクトの名称を変更</p> <p>平成 19 年 5 月、プロジェクトリーダーの変更に伴い研究開発の実施体制を変更</p> <p>平成 19 年 8 月、評価に関する事項及び、その他重要事項を変更</p> <p>平成 20 年 3 月、中間評価結果を受けて研究開発の目標、目標値、実施内容等を変更</p> <p>平成 20 年 6 月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「研究開発の目的」の記載を変更</p> <p>平成 21 年 2 月、プロジェクトリーダーの変更に伴う実施体制の変更及び目的、目標の表現をより具体化して変更</p> <p>平成 22 年 3 月、プロジェクトを 1 年延長、これに伴い目標を追加。プロジェクトリーダー、サブリーダーの変更</p> <p>平成 22 年 11 月、平成 21 年度までの実施内容のフォローアップとして溶解試験を追加すると共に、認証用標準物質の作製を追加して変更</p>

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1. 1 NEDO が関与することの意義

省資源・省エネルギー、レアメタルの枯渇への対応、地球環境問題解決への対応、安心・安全な社会構築等を実現するための、一日も早い、より高度な特性を発現させる金属材料の開発が求められている。

具体的には、発電プラント等では、高温腐食や磨耗、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るほか、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（燃料消費量の削減）、地球環境問題への対応（CO₂削減）や部材交換頻度の減少等に伴う発電コスト軽減等が期待されている。

発電効率の向上等の技術開発については、「エネルギー基本計画」（平成 15 年 10 月閣議決定）に、安定供給の確保、環境問題への対応、エネルギー・コスト低減等の観点から重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及び施策の一つとして「電力に関する技術における重点的施策」に挙げられている。

一方、物質をナノレベルで制御することにより、物質の機能・特性を飛躍的に向上させ、広範な産業技術分野に革新的な発展をもたらし得るキーテクノロジーであるナノテクノロジーは、産業技術戦略（平成 12 年 4 月）における将来のフロンティアを切り拓く技術の研究開発（革新的・基盤的技術の涵養）に位置付けられる技術領域として経済産業省によりプログラム化され、研究開発の運営管理を新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が行うこととなった。さらに、同技術領域は、総合科学技術会議の分野別推進戦略（平成 13 年 9 月）においても、「産業競争力の強化と経済社会の持続的発展」等に不可欠な重点領域として改めて位置付けられた。

金属材料の新たな特性を引き出すこと、また、特性を飛躍的に向上させることは既存技術では限界に近づいており、ナノレベルの組成・組織制御技術が有望と考えられている。この手法の一つが金属材料の超高純度化技術であり、金属を超高純度化すると予想もしなかった特性が発現する。この現象を基に新しい金属学「ナノメタラジー」が誕生した。この概念を発展させるため、平成 13 年度～18 年度に NEDO において「ナノメタル技術」プロジェクトが実施され、「ナノメタラジー」は、飛躍的特性を有する革新的金属材料の発掘手法として極めて有望であることが実証された。

超高純度金属材料は新しい材料であり、産業化のためには技術的な検討課題が多く存在し、開発には大きなリスクを伴うので、民間だけでは実施が困難である。このため、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 が関与する研究開発事業として進めていく必要がある。

本事業は、資源に乏しい我が国が将来に亘り持続的発展を遂げるため、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、また、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。

1. 2 実施の効果

本プロジェクトは、超高純度金属材料の産業化に向けては、発電プラント等への適用を想定すると材料を多量に使用することから、優れた特性を維持しながら超高純度金属材料の低コスト・量産化技術の確立を目指すものであり、大幅な環境負荷低減、省エネルギーの実現に資するものである。また、幅広く国際貢献が達成できる。

具体的な政策効果は以下の通りである。

- ・ 日本発の超高純度金属材料(ナノメタル)開発により、世界に先駆けて「メタル革命」を興し、最先端基幹産業であるエネルギー産業界の飛躍を実現する。
- ・ 本プロジェクトによって、次世代エネルギー基幹産業に不可欠な発電プラント等の大幅な「高効率化」・「環境負荷低減」及び「メンテナンスフリー化」・「ロングライフ化」が実現できる。
- ・ レアメタル若しくは高価な貴金属の使用量の低減が可能である他、ナノメタルに関する新しい製造技術の開発と確立、さらにはナノメタル産業が興る。
- ・ ナノメタルに関する国際基準・規格を策定する。
- ・ 飛躍的特性を有する革新的金属に関する新しい金属学「ナノメタラジー」の研究とその実用化を支える研究者・技術者が育成できる。

また、具体的効果は以下の通りである。

- ・ 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（蒸気温度を数十℃上昇させることができた場合、プラント効率が 2～3%向上）による化石燃料使用量削減（CO₂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、廃棄物発電プラント等)
- ・ 分散電源の効率向上による省エネ、CO₂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)

2. 事業の背景・目的・位置付け

2. 1 事業の背景

我が国の金属材料の研究開発・技術力は世界のフロントランナーとして、産業界に多大な貢献をしてきた。近年、省資源・省エネルギー、レアメタルの枯渇への対応、地球環境問題解決への対応、安心・安全な社会構築等を実現していくため、さらに高度な特性を発現させる材料の開発が望まれている。しかしながら、これまでの元素添加と熱処理による金属材料の開発手法では、金属材料の新たな特性を引き出し、飛躍的に向上させることは限界に近づいている。

また、金属材料の組成制御技術及び組織制御技術の開発は、従来は経験的、実験的手法に拠るところが大きく、金属材料が本来有する強度、耐食性及び電気・磁氣的機能等の特性を十分に引き出せていない。「超高純度ベースメタルの科学」プロジェクト（科学技術振興事業団、平成8年度～12年度）では、不純物を極限まで除いた高純度化により特性が飛躍的に向上することが明らかにされた。また、「ナノメタル技術」プロジェクト（NEDO、平成13年度～18年度）では、超高純度金属材料の超精密な組成制御技術、超精密・超微細な組織制御技術及び組成分析・構造解析等の計測技術を確立し、技術の体系化を目指して、財団法人大阪科学技術センターへ委託して、特に Fe-Cr 系超高純度合金に関する研究開発を推進してきた（図1）。これらにより、金属の高純度化を原点とする「ナノメタラジー」は、金属本来の性質を引き出す革新的金属の発掘法として最も有効であることを明らかにしてきた。

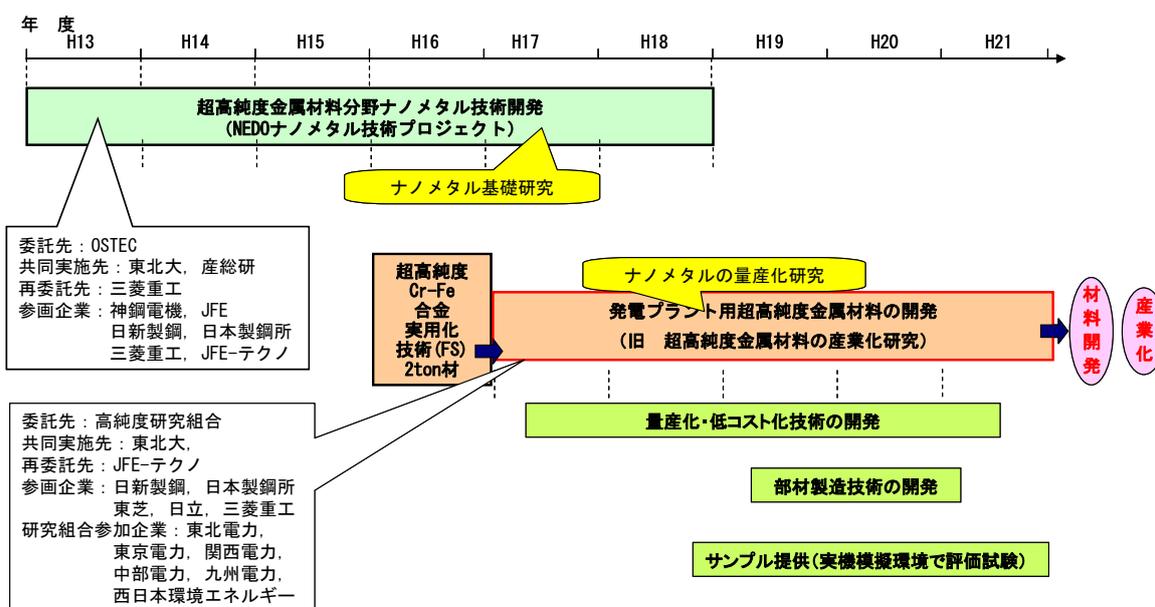


図1 本研究開発の背景（開始時点）

これらの成果を受けて、最も重要な国家基盤産業の一つである電力産業における発電プラントの「高効率化」・「メンテナンスフリー化」・「ロングライフ化」などによる飛躍的発展及び超高純度金属材料の国際的な基準・標準・規格化を図り、超高純度金属材料の産業化に向けた量産化基礎技術開発を目指すために、本プロジェクトを開始することとした。

(参考) 超高純度金属材料とは

- ・ 超高純度金属の研究は、東北大学 安彦兼次(元 金属材料研究所 客員教授)を中心に進められてきた。平成8-12年度、JST戦略的基礎研究推進事業「超高純度ベースメタルの科学」によって、超高純度鉄の研究は加速し、新しい金属学「ナノメタラジー」が生まれた。
- ・ ナノメタラジーの概念に従い、鉄に含まれる不純物元素*を低減し、99.999%以上に超高純度化すると、鉄は軟らかくなり、延性や耐食性が向上するなど、既存の鉄では考えられない特性が発現した。
 - * 不純物元素： C、Si、Mn、P、S、O、N、H など
- ・ 平成13-18年度、NEDO「ナノテクノロジープログラム/ナノマテリアル・プロセス技術/ナノメタル技術」プロジェクトでは、Cr-Fe系合金を中心に、含まれる不純物元素をナノレベルで制御することによって、既存金属材料の特性を遥かに凌駕する金属材料が生まれることが判明し、基礎的検討が進められた。

2. 2 事業の目的

金属の超高純度化とその組成を超精密に制御することにより機械的特性(強度、延性等)、耐環境特性(耐食性等)等の特性を飛躍的に向上させることが可能となる。そこで、本事業の目的は、「ナノメタル技術」プロジェクトにより得られた画期的なナノメタルの研究成果を産業化に繋げることとする。

超高純度金属材料は耐環境性、靱性、加工性等従来の材料と比較して遥かに優れた特性を有することが明らかになっているため、産業化への課題として、優れた特性を維持しながら材料の低コスト・量産化技術の確立を目指し、具体的には以下を実施する。

- ① 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発
- ② 開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価

本事業で得られる革新的金属材料を実用化することによって、発電プラントにおける大幅な「高効率化」、「環境負荷低減」が達成されるのみならず、「メンテナンスフリー化」、「ロングライフ化」が実現できることから、環境負荷の低減や安心・安全の追求に大きく貢献するなど意義深い成果が生まれる。

2. 3 事業の位置付け

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、安心・安全な社会構築等の早期実現が切望されている。そのため、飛躍的特性を発現させる革新的な金属材料が不可欠である。昨今、例えば、発電プラント等では、高温腐食や磨耗、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るほか、より高温、過酷環境で利用できる構造部材の開発が望まれている。これは、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（CO₂削減）や部材交換頻度の減少等に伴う発電コスト軽減等が達成可能と期待されるからである。これらは、エネルギー政策基本法（平成14年法律第71号）に基づく「エネルギー基本計画」（平成15年10月閣議決定）に、安定供給の確保、環境問題への対応、エネルギー・コスト低減等の観点から重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及び施策の一つ「電力に関する技術における重点的施策」に上げられている。

本事業は、図2に示すように、東北大学での基礎研究から生まれた「ナノメタラジー」を基とし、NEDO「ナノメタル技術」プロジェクトでの実用化の基礎研究を経て、その実用化へ向けた要素技術開発を行うものである。即ち、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、また、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およ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。

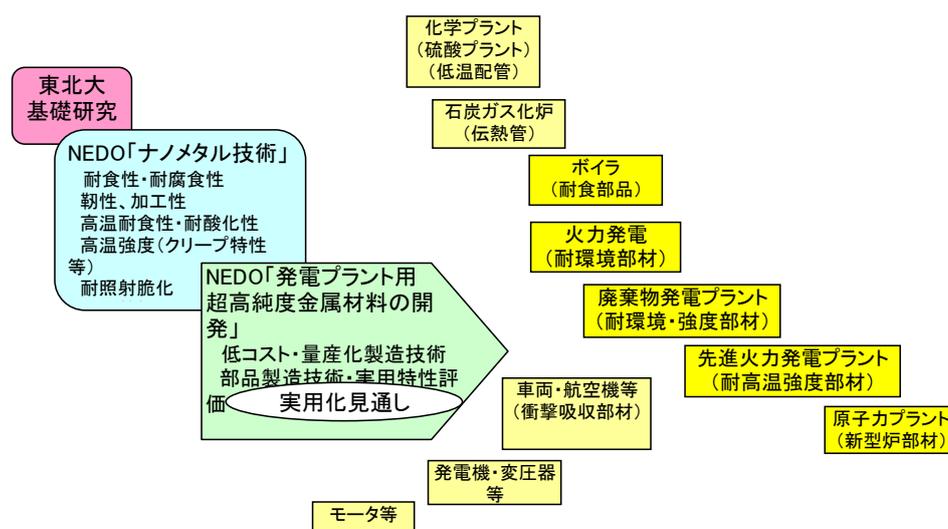


図2 本研究開発の位置付け

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

超高純度金属材料は、耐環境性、靱性、加工性等従来の材料と比較し遥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。産業化に当たっては、発電プラント等での利用を想定すると、優れた特性を維持した材料の低コスト・量産化の技術開発が必須である。

本事業では、以下を研究開発目標とする。

(1) 研究開発項目①「超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発」

【中間目標】

- ①低コスト原料から精錬等により、超高純度金属材料が得られる目途を付ける。
- ②試作素材について、優れた材料特性が維持されていることを確認する。

【最終目標】

- 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)
- ②低コスト原料から C, Si, Mn, P, S, N, O の不純物総量が 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及び精錬技術を開発する。

(2) 研究開発項目②「開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価」

【中間目標】

- ①開発素材の優れた特性を低下させない部品製造技術の目途を付ける。
- ②性能／コスト比が最終目標を満たすと見込まれる製造技術の目途を付ける。

【最終目標】

- ①不純物濃度と各種特性の関係を明らかにする。
- 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途をたてるもの）
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

○目標：

- ・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

○目標：

- ・現用材である SUS310 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
- ・350～400℃の温度域でのクリープ破断強度 100MPa 以上
- ・現用材である SUS310 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）

(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、開発材料を 700℃級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。

○候補材料系：Fe-Cr-Ni 系超高純度合金

○目標：

- ・実用化段階の目標である 700℃、 10^5 時間におけるクリープ破断強度が 70MPa 以上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℃、 10^5 時間のクリープ破断強度が 70MPa 以上であること。
- ・現用材である SUS304J1HTB と同程度の加工性と溶接性があること。
- ・既存加工プロセスで製作が可能なこと。

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。

2. 事業の計画内容

2. 1 研究開発の内容

2. 1. 1 研究開発項目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) 研究開発の必要性

京都議定書の発効に伴いCO₂の削減がさらに重要な課題となっている今日、産業部門でCO₂排出量の多い火力発電での高効率化が期待されている。耐環境性、靱性等に優れた発電プラント用超高純度金属材料（Fe-Cr系合金等）の低コスト・量産化技術を開発することができれば、発電効率の向上及び大幅なCO₂排出量の削減が見込まれる。

超高純度金属材料（Fe-Cr系合金等）を製造するためには、現状、高価な高純度素材を原料に用いた高真空溶解を行っており、工業規模での低コスト、量産化を図るため、低コスト原料を用いた新規精錬技術等の研究開発が不可欠である。

(2) 研究開発の具体的内容

①高耐久ルツボ・耐火材の開発

不純物の溶出が少なく、かつ、耐久性に優れた新規な高純度ルツボ・耐火材の開発として、CaOルツボの表面改質技術、CaO原料粉末粒度の最適化、MgO、ZrO₂等酸化物の添加等の研究開発を実施する。さらに、溶解炉大型化に向けた耐火材の開発を行う。

②新規精錬技術開発

低コスト原料から超高純度金属材料を溶製するため、水素、アルミニウム等を用いた精錬技術を利用して高純度溶解技術を開発する。

③高真空誘導溶解炉の開発

溶解量100kg級の高真空誘導溶解炉（VIM炉）を設計・設置する。この高真空誘導溶解炉を用いて、従来の超高純度金属材料の製造法に比較して、低コスト化と不純物総量の低減が可能な溶製技術であることを実証する。

④認証用標準物質の作製

超高純度鉄の作製を行い、認証用標準物質として登録する。

2. 1. 2 研究開発項目②「開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価」

(1) 研究開発の必要性

現在、火力発電プラントでは、大型鍛造品には低合金鋼等が、蒸気配管には9Cr～12Cr鋼等が、伝熱管にはステンレス鋼等が主に利用されている。このような従来材については、発電効率を高めるために、より高温での強度・耐環境性等を求め研究開発が行われているが、金属材料の新たな特性を引き出し、また、飛躍的に向上させることは既存技術（元素添加と熱処理による手法等）では限界に近づいている。

従って、研究開発項目①で得られる超高純度金属材料の特性評価試験を実施し、従来金属材料を遥かに凌駕する特性を有する材料を開発する必要がある。さらに、得られた超高純度金属素材について、その優れた材料特性を損なわずに発電プラント等で利用するため

に、材料に適した各種の接合、加工技術の研究開発を行うことも必要である。

また、加工した部材について、産業への適用性を実証するために、火力発電プラント等の実環境下での特性評価試験等を行う必要がある。

なお、開発材を実際に産業化するためには、システムメリットが現用材を上回る必要がある。本事業で開発する素材について、実際に想定される部材について、開発部品の性能とそのコスト試算、適用を考えているシステムでのトータルシステムメリットを試算する必要がある。

(2) 研究開発の具体的内容

① 超高純度金属材料の開発

超高純度 Fe-Cr 系合金又は超高純度 Fe-Cr-Ni 系合金（主として耐環境性が要求される部材が対象）及び超高純度 Fe-Cr-Ni 系合金（主として強度が要求される部材が対象）について、研究開発項目①で開発した高真空誘導溶解炉を用いて、超高純度金属材料溶解試験及びその特性評価試験を実施し、適用候補部材毎に設定した開発目標を達成していることを確認する。また、汎用溶解炉を用いた溶解試験等で不純物濃度をパラメータとした試験を実施し、産業化レベルでの不純物濃度と各種特性の関係を明らかにし、有害元素の見極めと低減方策を明確化する。さらに適用対象部材に合わせた低減すべき不純物濃度を規定する。

プロジェクト参加各社へのサンプル提供による評価を実施するとともに、公的研究機関へのサンプル提供も検討する。

② 部材製造技術開発

上記①で開発する超高純度金属材料を用いて、煙突ライナー・煙道、廃棄物発電プラント用過熱器管等を実用化するに際して、必須な接合、塑性加工、機械加工等の部材製造技術を開発する。

③ 実プラントによる実用性評価試験

発電プラント用部材としての適合性評価のため、火力発電プラント等の実プラントで実用性を評価する試験を実施する。

また、実用化に耐え得る性能向上及び実用化への見通しを付けるのに必要なデータの収集を行う。

④ システムメリットの試算

開発部材を用いた機器単体についての LCA 評価を行い、現用材を用いた場合との比較を行う。システムメリットの計算により、プロジェクト終了時に民間企業からの投資が得られるような商業ベースが成り立つようプロジェクトの目標の見直し等を適宜行う。

2. 4 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO が単独ないし複数の原則本邦の企業、研究組合、公益法人、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施者を選定の上、委託して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDO が委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）及びサブプロジェクトリーダーを置き（これらの就任者を表 2 に示す）、その下に効果的な研究開発を実施する。具体的な実施体制を図 4 に示す。

表 2 プロジェクトリーダー及びサブプロジェクトリーダーの変遷

就任時期	プロジェクトリーダー	サブプロジェクトリーダー
平成 17 年 7 月 1 日 ～ 平成 19 年 3 月 31 日	齊藤 正洋 (超高純度金属材料技術研究組合)	
平成 19 年 4 月 1 日 ～ 平成 20 年 9 月 30 日	山本 博一 (超高純度金属材料技術研究組合)	
平成 20 年 10 月 1 日 ～ 平成 22 年 3 月 19 日	菅原 彰 (超高純度金属材料技術研究組合)	(就任は平成 21 年 1 月 6 日) 児島 慶享 (株)日立製作所 山田 政之 (株)東芝 納富 啓 (三菱重工業株)
平成 22 年 3 月 20 日 ～ 平成 23 年 2 月 28 日	廣田 耕一 (超高純度金属材料技術研究組合)	村田 憲司 (九州電力株) 金谷 章宏 (九州電力株)

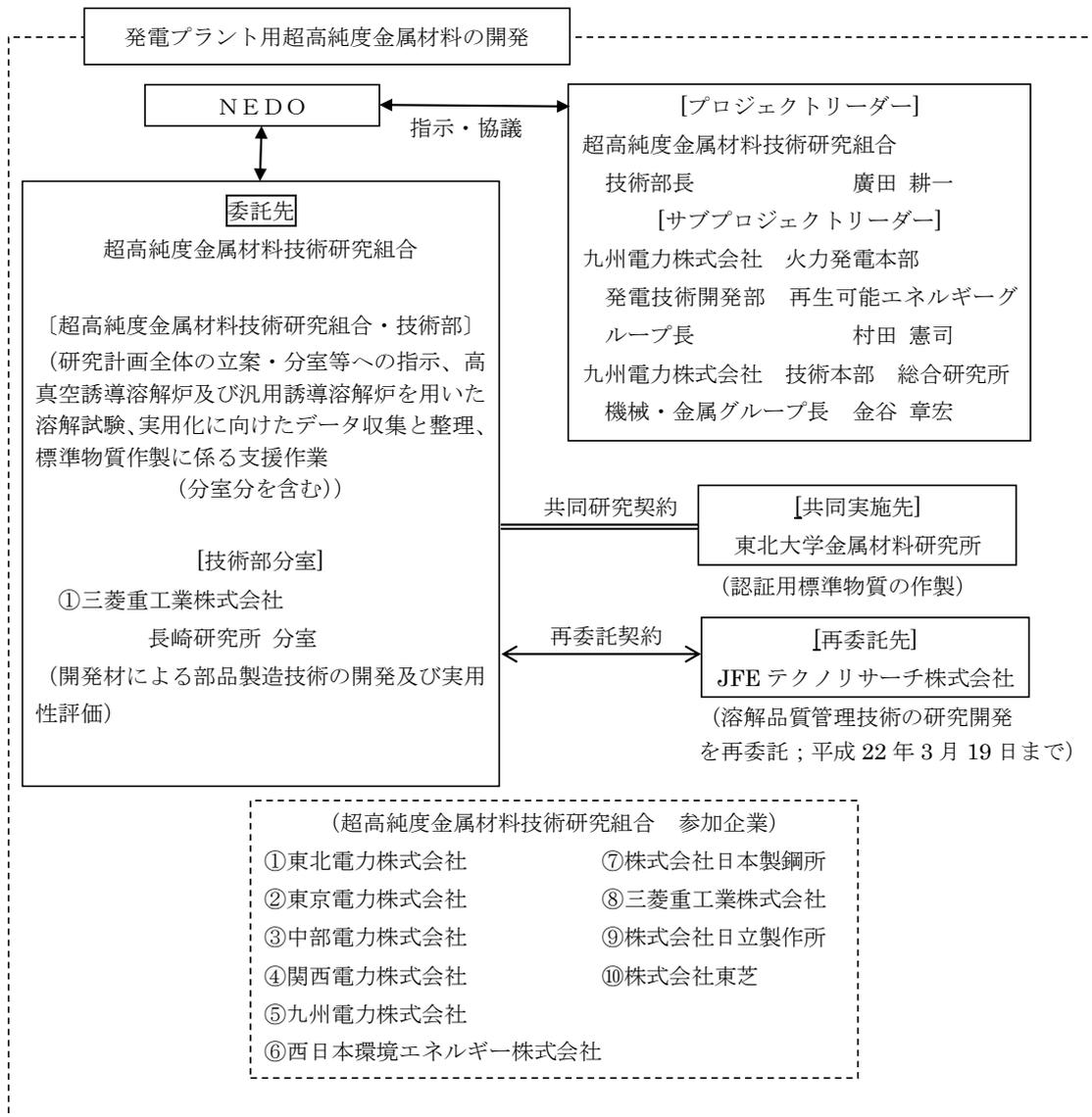


図 4 研究開発の実施体制（プロジェクト終了時）

2. 5 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。このため、必要に応じて、NEDO に設置する委員会及び技術検討会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受ける等を行う。具体的な推進体制を図5に示す。また、開催した技術委員会の概要を表3に示す。

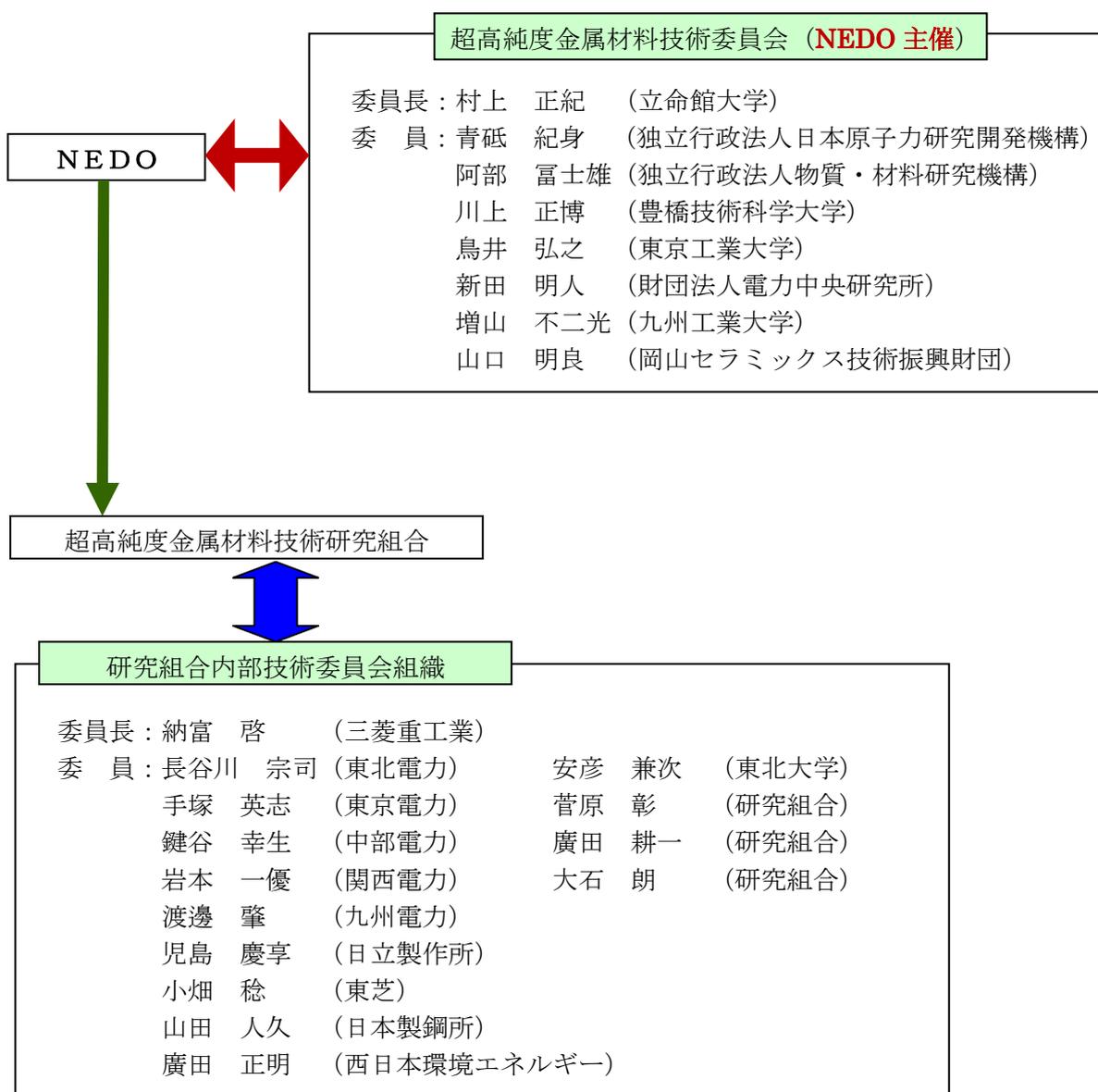


図5 研究開発の支援体制

表3 超高純度金属材料技術委員会 開催実績

回数	開催日	場所	検討事項概要
1	平成18年4月10日	NEDO 1901 会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクト実施の経緯説明 ・プロジェクトリーダーの紹介 ・研究開発の課題と方向性に関する協議
2	平成19年3月16日	研究組合 会議室 (田町)	<ul style="list-style-type: none"> ・平成18年度成果(部材開発等) 審議 ・平成19年度実施内容の審議 ・中間評価に向けた検討
3	平成19年12月13日	NEDO 2101 会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・平成19年度進捗(溶解・分析関係、加工・評価関係)の報告 ・中間評価結果の説明と対応策に係る協議
4	平成20年2月29日	NEDO(日比谷) 第1会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・中間評価結果への対応策及び基本計画の変更に係る審議
5	平成20年5月15日	NEDO(日比谷) 第1会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・基本計画変更の報告 ・低コスト化及び開発部材の分類と目標設定等に係る協議
6	平成21年5月15日	NEDO 2101 会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・技術委員会からの助言等への対応状況報告 ・平成20年度進捗報告 ・平成21年度実施内容協議
7	平成21年12月21日	NEDO 2302 会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・平成21年度進捗(ルツボ開発、不純物濃度、超高純度金属材料開発)報告 ・プロジェクト期間延長に係る審議
8	平成22年1月26日	NEDO 2302 会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクト期間延長に係る審議 ・平成22年度実施内容、判断基準等の協議 ・基本計画変更等の審議
9	平成23年1月13日	NEDO 2301 会議室	<ul style="list-style-type: none"> ・平成22年度進捗(長期高温高強度部材のクリープ等試験結果)の報告 ・プロジェクトの総括及び今後の方向性に関する審議

3. 情勢変化への対応

3. 1 情勢変化への対応

- (1) 平成 18 年度に、低コスト・量産化製造技術の研究開発において、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高純度耐火材料(URC:Ultra Refined Ceramics)を開発し、さらに製造方法を工夫することで従来の 10 倍以上の耐久性を達成できる可能性を確認できたので、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当初の計画に追加して実施した。
- (2) 平成 18 年度に、低コスト・量産化製造技術の研究開発において、金属の高純度化に係る水素精錬技術について、東北大学のコールドクルーシブル炉、日本製鋼所の小型炉と段階を追って優れた成果が得られたため、水素付加装置を前倒しで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) 委託先の一部企業から、産業化に向けてプロジェクト終了後も研究を継続する意向が示されたため、そこへの橋渡しができるように有望な候補材料である高温高強度部材について評価中のクリープ強度試験等の見極め等が行えるよう実施期間を 1 年延長し、プロジェクト成果の早期実用化を目指した。
- (5) 産業化する際に重要となる標準化についても端緒を開いて早期実用化に貢献するよう、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行うこととした。

3. 2 研究開発マネジメント上の工夫

- (1) 集中研と参画企業の設置された集中研分室での研究開発となるため、各研究場所間の連携がスムーズに行えるよう、委託先に研究推進委員会とその下部委員会を設置して情報の流通改善を図ることとした。
なお、委員会のメンバーには、一部外部有識者にも参加を依頼するよう努めた。
- (2) 関連するプロジェクトである「ナノメタル技術」の成果を十分に活用して研究開発を進めるため、合同で成果報告会を開催する等効果的な連携を図った。報告会としては「ナノメタルシンポジウム」を平成 18 年 12 月 4～5 日に千代田放送会館で開催し、金属材料組成制御、成分分析、超高純度金属材料の材料特性等について講演 14 件、パネルディスカッション・招待講演等で活発な意見や情報の交流を図った。

4. 中間評価結果への対応

平成 19 年度に中間評価を実施した。中間評価の結果を受けて企画調整部及び研究評価部と検討・協議を行い、委託先とも相談して、当初計画や実施体制の見直し等の対応計画を作成し、超高純度金属材料技術委員会での審議も踏まえて変更を行った。

4. 1 中間評価概要

《総合評価》

金属の超高純度化は、発電プラントや、航空・宇宙関連機器など安全性・信頼性が要求される部材の開発に不可欠の技術であり、長期的展望にたつて研究を展開していく必要がある。また、超高純度材料が低コストで実用化されたときの材料製造分野への波及効果は大きい。したがって低コスト超高純度金属材料技術開発を目指す本プロジェクトへの NEDO の関与は妥当と考えられる。

しかしながら本開発プロジェクトは、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んでいるとはいえない。例えば、Fe-Cr 系合金は耐用温度が低く、開発対象部材であるガスタービン翼への実用化は非現実的である。また、全体的に設定目標が曖昧で具体性を欠く傾向がある。メーカーやユーザーとの連携を良くし、開発目標の再設定や合金選択の変更も検討する必要がある。

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。プロジェクトの意義、目標、成果などを積極的に公表し、学界や社会からの理解、支援あるいは批判を受けつつプロジェクトを軌道修正し発展させていくことが、国費を使った大型プロジェクトとして必要である。今後の積極的な情報発信・広報活動が強く求められる。

《今後に対する提言》

本プロジェクトの開発技術は、発電プラントだけでなく航空宇宙関連機器など他の用途の金属材料の製造にも有用なプロセスと成り得る。いずれの場合も、すべての含有元素を超高純度レベルまで低減するのではなく、開発材の用途に応じて必要な各元素濃度レベルを把握し、それに対応した精錬技術を開発することが重要である。また、用途や材料の選択にあたっては、NEDO 等で計画・実行されている他のプロジェクトとの連携を積極的に考慮する必要がある。その際、コストパフォーマンスを必ずしも要求されない先進的あるいは特殊な小型の部材などについても開発技術を適用していくことが必要であろう。

本プロジェクト終了後の次の段階は、民間資金による研究開発、あるいは一部民間資金を導入して責任分担を明確化した研究開発とすべきである。そのためには、残された約3 年間に、適切な対象部材を選定し民間企業の投資が得られるレベルまで開発を進める必要がある。また、基礎研究については、これまでの長期間にわたる研究成果を踏まえて、新現象の発見や新領域の確立を目指した研究を各種競争的資金等により継続的に実行していくのが望ましい。

4. 2 中間評価への対応

代表的な中間評価結果への対応策を以下に示す。

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
<p>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るとはいいがたい。</p>	<p>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</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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しうるものに絞り込む
<p>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くきらいがある。</p>	<p>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</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>（例）実用化検討部材</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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）
<p>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。</p>	<p>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</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・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
<p>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。</p>	<p>学会発表：1 件（金属学会） 特許出願：1 件 新聞掲載：1 件</p>	<p>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</p>

5. 評価に関する事項（中間評価）

- (1) 実施時期：平成 19 年度
- (2) 評価手法：外部有識者による評価
- (3) 評価事務局：新エネルギー技術開発部
- (4) 評価項目・基準：標準的評価項目・基準
- (5) 評価委員（分科会委員；敬称略）：

分科会長：原田 広史（独立行政法人物質・材料研究機構）

分科会長代理：高木 節雄（九州大学）

委員：月橋 文孝（東京大学）

坂本 満（独立行政法人産業技術総合研究所）

中里 英樹（大阪大学）

秦野 正司（電源開発(株)）

丸山 正明（日経BP社）

吉野 隆（川崎重工業(株)）

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1. 1 最終目標達成状況

最終目標の達成状況は以下の通りであり、目標は概ね達成できたものとする。

項目	最終目標	最終目標達成状況
①超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発	<p>◇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）</p> <p>◇低コスト原料からC, Si, Mn, P, S, N, Oの不純物総量が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及び精錬技術を開発する。</p>	<p>◇CaO骨材の粒度配合を最適化し、充填密度を向上させる等により強度、溶鋼差込み抑制、耐水和性を向上、極めて汚染源となりにくく高耐久性（溶解回数10回以上達成）のルツボを開発できた。また、本ルツボ（100kg用）は量産時に1個当たり40万円以下の見通しが得られた。</p> <p>◇既存技術での不純物除去プロセスをフロントエンドとして、本プロジェクトにより開発した100kg級誘導溶解炉を用いて原料溶解を、本溶解システムによる不純物汚染を極少化しつつ実施し、左記不純物総量を50ppm以下とする溶製を達成した。</p>
②開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価	<p>◇不純物濃度と各種特性の関係を明らかにする。</p> <p>◇新材料による部材の開発と評価</p> <p>(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用途</p>	<p>◇不純物濃度を極少化していくことにより、金属の延性、耐食性が増し、溶接性の向上も認められる。この特性は合金の場合、合金元素間の結合等の影響が不純物濃度差より大きい場合、不純物濃度による材料特性の有意差が見えにくいですが、シャルピー衝撃値や耐力向上等には伺えることがわかった。</p> <p>◇新材料による部材の開発と評価結果は下記の通りであった。</p> <p>(a)実用化検討部材（Fe-Cr系超高純度合金としてFe-20Cr系鋼を溶製</p>

	<p>をたてるもの)</p> <p>開発材料を火力発電プラントの煙突ライナー・煙道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。</p> <p>○候補材料系：Fe-20Cr 系超高純度合金</p> <p>○目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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) <p>(b) 中期的開発部材 (2015 年頃に実用化が期待できるもの)</p> <p>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。</p> <p>○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</p> <p>○目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現用材である SUS310 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 SUS310 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 	<p>し試験を実施)</p> <p>○硫酸露点腐食：SUS316 に比べ 7 倍程度の優れた耐食性を示し、ほぼ達成した。</p> <p>○室温耐力：室温での 0.2%耐力は 300MPa 以上あり、達成。</p> <p>○薄板加工性、溶接性：溶製した高純度合金の薄板加工性は良好で SUS316 より優れる。また、溶接性に関して特に支障となる問題点はなかった。</p> <p>○想定コスト：電解鉄溶製をルツボ溶製で簡易化できる可能性が想定され、達成の見通しが得られた。</p> <p>(b) 中期的開発部材 (Fe-Cr 系超高純度合金として Fe-30Cr-30Ni 系鋼を溶製し試験を実施)</p> <p>○耐食性：SUS310 の 3.3 倍程度の耐食性を有している。</p> <p>○室温耐力、伸び：室温 0.2%耐力は約 600MPa で目標達成。但し、伸びは 1%未満と延性が小さい。これは純度によらず、合金元素の組成によるものと考えられる。</p> <p>○チューブ加工性、溶接性：本材料に対しては鍛造性に課題が見つかった。組成や鍛造条件のパラメトリック評価で改善される可能性がある。</p> <p>○想定コスト：(a)に同じ。</p>
--	--	---

	<p>産時)</p> <p>(c) 長期的開発部材 (2030 年頃に実用化が期待できるもの)</p> <p>平成 22 年度においては、開発材料を 700℃級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> <p>○目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実用化段階の目標である 700℃、10⁵ 時間におけるクリープ破断強度が 70MPa 以上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℃、10⁵ 時間のクリープ破断強度が 70MPa 以上であること。 ・現用材である火 SUS304J1HTB と同程度の加工性と溶接性があること。 ・既存加工プロセスで製作が可能なこと。 <p>◇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。</p>	<p>(c) 長期的開発部材 (Fe-Cr-Ni 系超高純度合金としてカテⅢ材：Fe-18Cr-20Ni-2Mo-2W 系鋼を溶製して試験を実施)</p> <p>○クリープ破断強度：平成 22 年度には各種のまま材、加工材試験片の 5000 時間までのクリープ破断試験を実施し、ラーソンミラーパラメータ法による外挿を行い、実用化段階の目標である 700℃、10⁵ 時間におけるクリープ破断強度が 70MPa 以上あることを見通すことができた。</p> <p>○加工性、溶接性：本材料は溶接割れ感受性が高いことがわかったため、発電プラント用部材としては非溶接部位に用いるか、溶接性の改善が必要である。後者については添加した P が低融点共晶を生じている可能性が観察されており、一方、微小析出物の普遍化による強度向上効果は期待されるので、これらを踏まえた改善を今後の課題とする。</p> <p>◇開発材をボイラー過熱器管に用いたケースを想定し、耐食性に優れるメリットを生かしてメンテナンス回数にて評価しシステムメリットを試算した。その結果、このケースでは保守費用が 30 億円/25 年輕減される等システムメリットが見込まれることがわかった。</p>
--	--	--

1. 2 各項目の成果概要

研究開発項目	実施項目	計画	成果概要
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 高耐久ルツボ・耐火材の開発	新規ルツボ・耐火物の開発を行い、開発したルツボ・耐火物の特性評価試験を行う。 ①-3 で新設する溶解炉用の高耐久ルツボを製造・溶解に実用し、大型化を目論む。	溶解使用可能回数 10 回以上の高耐久性を有した新規 URC ルツボを開発し、超高純度金属溶製に相応しい溶解時汚染の少ない特性を明らかにした。大型化を目論み、レンガ積み構造モデルを作製し耐久性を見通した。
	①-2 新規精錬技術開発	水素精錬、アルミニウム精錬、真空精錬等の精錬技術の超高純度金属溶製への適合性を評価し、超高純度金属材料精錬システムの概念を確立する。本システムで主要 7 不純物元素の総量が 50ppm レベル以下となることを実証する。	各種の精錬技術が超高純度金属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主要不純物総量の目標値を達成することを実証した。
	①-3 高真空誘導溶解炉の開発	100kg 級の高真空誘導溶解炉を新たに開発、設置し、溶解試験を実施する。また、溶湯サンプリング装置と迅速分析装置を開発して溶解中の迅速な成分分析を実施し、成分調整、微量組成制御を実証する。①-1、2 と相俟って低コスト・量産可能な実用溶解システム概念を構築する。	真空槽を超清浄雰囲気とできる 100kg 級高真空誘導溶解炉を開発し、設置した。また合金溶製に不可欠な迅速溶湯サンプリングと成分微調整が可能な分析装置等を開発、付設した。これらをもとに URC ルツボを用い、溶解時汚染を極少化するトン級大型連続鑄造システム概念を策定し、低コスト・量産化の見通しをつけた。
	①-4 認証用標準物質の作製	東北大コールドクルーシブル炉を用いて国内外標準化登録を目的とした認証用標準物質を作製する。	高純度鉄を原料とし、東北大コールドクルーシブル炉を用いて 6N レベルの純度の認証用超高純度鉄を溶製した。

<p>②開発材による 部品製造技術の 開発及び実用特 性評価</p>	<p>②-1 超高純 度金属材料の開 発</p>	<p>超高純度 Fe-Cr 系又は Fe-Cr-Ni 系合金につき社会的ニーズを踏まえた用途別開発を行う。この合金を①で開発した高真空誘導溶解炉により溶製し、各種特性を評価するとともに不純物濃度の効果を明らかにする。</p>	<p>超高純度 Fe-Cr 系又は Fe-Cr-Ni 系合金につき、社会的ニーズを踏まえた用途と実用化までの時間軸を考慮し、3 種のカテゴリーに分類して開発した。</p> <p>【カテゴリーⅠ材】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Fe-20Cr 系鋼を開発。 ・ 硫酸露点腐食で SUS316 の 7 倍程度の耐食性達成。 ・ 室温耐力 300MPa 以上 ・ 薄板加工性良好、溶接性問題なし。 <p>【カテゴリーⅡ材】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Fe-30Cr-30Ni 系鋼を候補として開発。 ・ SUS310 の 3 倍以上の耐食性確認。 ・ 室温耐力は約 600MPa だが、伸びが 1%未満と少ない。 ・ 鍛造時に割れの課題抽出、延性と合せ、組成、鍛造条件等のパラメトリックな評価で改善の可能性。 <p>【カテゴリーⅢ材】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Fe-18Cr-20Ni 系鋼を開発。 ・ 700℃、10⁵時間のクリープ破断強度が 70MPa 以上であることの見通しを得た。 ・ 溶接割れ感受性が高く、溶接不要部材として高強度（100MPa）活用可能性。 ・ 微小析出物の普遍化による強度向上効果は維持しつつ添加元素のサーベイに
--	----------------------------------	--	--

			<p>よる溶接性向上で強度部材開発の可能性あり。</p> <p>【不純物濃度の効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・不純物濃度を極少化していくことで延性、靱性、耐食性等が増加、加工性や溶接性も向上する。
②-2 部材製造技術開発	②-1 で開発した超高純度合金の部材製造に必要な、鍛造、圧延、製管等の素材加工技術及び溶接技術、部品製造技術を開発する。	<ul style="list-style-type: none"> ・①で開発した高真空誘導溶解炉により溶製した Fe-Cr 系超高純度合金の鍛造、圧延、製管等の素材技術並びに溶接技術を検討し、実機を模擬した圧延ラインを用い、圧延板、シームレスチューブ、型鍛造動翼等の発電プラント用部材の製造技術を開発した。 ・TIG、狭開先 TIG による溶接技術を開発し、その継手特性が良好なことを確認した。 ・発電プラント用部品例として超高純度合金による熱交換器やベローズを試作し、極薄板圧延製品の製造技術を実証した。 	
②-3 実プラントによる実用特性評価試験	超高純度合金を実際のプラントの過酷環境に置き、実用性を評価する。	耐環境部材（カテゴリー I）を廃棄物発電プラントの運転環境下において実証調査を行った。本調査での曝露試験観察結果では、超高純度 Fe-20Cr 系鋼等の耐食性は比較材として用いた SUS316 材に比べ実用性に遜色ないことを実証した。	

<p>②-4 システムメリットの試算</p>	<p>超高純度金属材料を用いた機器の経済性の評価を実施、現用材と比較する。</p>	<p>超高純度金属を適用した際の経済性評価を行い、廃棄物発電プラントの三次スーパーヒータへ適用すると、メンテナンスコストの低減により、トータルコスト低減が可能との試算結果を得た。開発材をボイラー過熱器管に用いたケースを想定し、耐食性に優れるメリットを生かしてメンテナンス回数にて評価しシステムメリットを試算した。その結果、このケースでは保守費用が30億円/25年輕減される等システムメリットが見込まれることがわかった。</p>
------------------------	---	---

2. 研究開発項目毎の成果

2. 1 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発

2. 1. 1 超高純度金属材料を作る

これまで、超高純度金属は超高真空技術を応用したコールドクルーシブル溶解炉で10kg級溶製が行われ、金属本来の特性を解明する基礎研究に用いられてきた。超高純度金属材料は、飛躍的特性を有する革新的金属材料として、さまざまな最先端産業に「ナノメタル革命」をもたらす可能性がある。この超高純度金属を金属材料として産業化するためには、低コスト化を念頭に量産化を図ることが必須である。このため、本プロジェクトにおいては、超高純度金属材料を「作る技術」における低コスト・量産化因子として、金属材料の溶製方法と精錬に係る製造要素、即ちルツボ、溶解炉、精錬システム等を対象として各要素における低コスト・量産化概念を研究開発し、産業化への道筋を見通すこととした。

具体的には耐久性があり、溶鋼に対する汚染の少ないルツボの開発、既存技術による不純物除去プロセスをフロントエンドとして、超高純度金属材料の溶製を行う精錬システム、このシステム概念に組み込まれる100kg級高真空誘導溶解炉の開発等を駆使して超高純度金属材料を「作る」こととした。

また、成果の普及を目論み、超高純度金属材料の国内外の標準化に道を開くため、超高純度鉄の認証用標準物質を作製し、登録に備えることとした。

なお、本プロジェクトでは99.9999%レベル(6N)～99.999%レベル(5N)レベルの不純物濃度の金属材料を超高純度金属材料と称している。

2. 1. 2 高耐久ルツボ・耐火材の開発

超高純度金属材料を溶製するには溶解炉での汚染が極力抑制できることが重要であり、このためには通常水冷の銅製ルツボなどが用いられる。この場合、大量の溶解には時間的・コスト的な制約が大きく、現実的ではない。

このため、耐火材を用いた簡便なシステムが開発できれば、低コスト・量産化への有力な足がかりが得られることとなる。

耐火物ルツボとしては溶鋼との反応などを考慮し、CaOルツボが適切として、このルツボの課題を解決していくアプローチで研究開発を行った。

市販ルツボ・耐火材に対する調査結果から、CaOルツボの欠点である水和性の問題を含め、耐久性の面でも大きな課題があることが分かった。そこで、その原因究明と耐久性改善のため、市販CaOルツボ材の試験、汎用高真空高周波誘導溶解炉を用いた溶解ルツボ状況の調査、溶鋼中への不純物元素の混入挙動の解明などを行った。また、既成品ルツボと対比しながら、それらの結果を基に新規ルツボの開発、それを用いた溶解実験と解析評価を行い、新規耐火材開発を進めた。即ち、高純度化を目論む組成調整及び性能改良を目指してURC(Ultra Refined Ceramics)ルツボの開発を進め、溶解使用可能回数的大幅な増加、水和性の改善など従来ルツボを凌駕することを明らかにした。

この結果、100kg 級の溶解用に一体型の新規 URC ルツボを開発できたため、量産化に向けた大型ルツボの検討を行い、大型化に必要となるレンガ積み構造について、先ず目地材の強度試験を実施し、良好な結果を得た。これを受けて、URC ルツボによる模擬的なレンガ積み構造モデルを作製し、実地に溶解を行って、耐久性の見通しをつけた。

以下に主要な開発成果を示す。

(1) 新規 CaO ルツボの開発

CaO ルツボを用いる場合には、水和性をいかに改善するかが大きな課題であり、市販 CaO ルツボの調査から、充填密度及び表面改質が重要であることがわかった。このため、焼成も考慮しながら適切な充填密度が得られるよう CaO 基材の粒度配合を最適化するとともに、表面改質により水和性を向上させ、焼結体強度を向上させる URC ルツボを新規に開発した。この新規 URC ルツボを用いた水和性試験結果を図 6 に示す。同図から試作ルツボの水和性改善が明らかとなった。

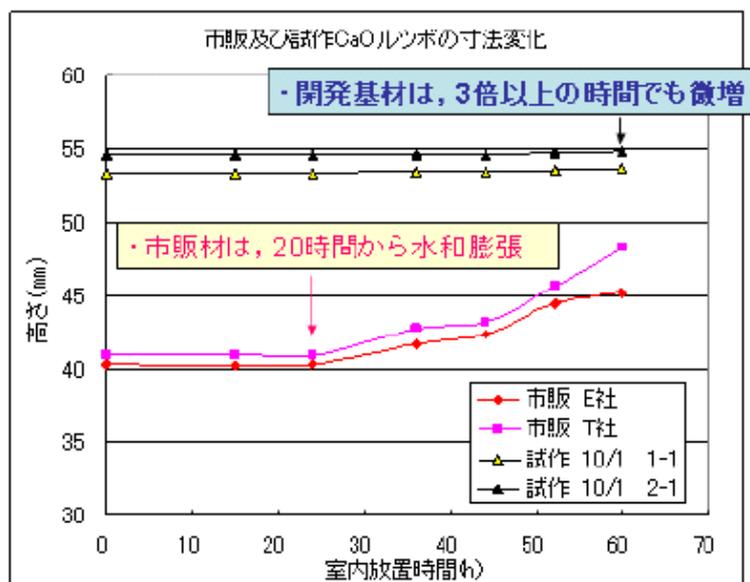
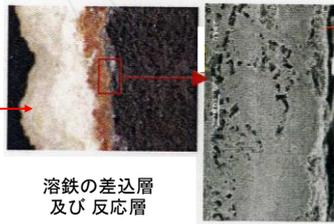
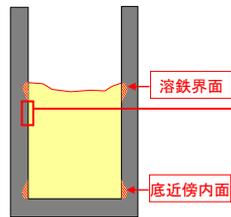


図 6 市販 CaO ルツボと新規ルツボの水和膨張比較

このような改善を施した新規ルツボと市販 CaO ルツボを用いて、脱酸剤として Al を添加した電解鉄溶解試験を実施した結果、図 7 に示すように、市販 CaO ルツボでは、その成形時に断層が生じ、それに沿って割れが進むために溶解寿命は概ね 2~3 回であることが分かった。また、電解鉄溶解に使用した市販 CaO ルツボの断面では、ルツボ内側表面から溶鉄差込層と溶鉄反応層が形成されている。一方、新規開発 URC ルツボの断面には溶鉄差込層、溶鉄反応層が形成されていないことが分かった。そして URC ルツボを用いた溶解実験によって、その寿命は後述するように溶解回数で 10 回以上であることが明らかになった。このように、新規開発 URC ルツボによる寿命改善は著しく、溶解の低コスト化に直結するルツボ・耐火材開発の基礎が確立された。

1. 市販CaOルツボ



市販CaO系ルツボの溶解後内面

ルツボ内面
溶鉄差込層 有
溶鉄反応層 有

2. 新規開発URCルツボ

新規開発ルツボの特徴

- ・溶鉄の差込みなし
→寿命改善
→低コスト化
- ・精錬効果向上



新規開発URCルツボの溶解後内面

ルツボ内面
溶鉄差込層 無
溶鉄反応層 無

図 7 鉄をAr中で高周波溶解した後の市販CaOルツボと新規開発URCルツボの断面

(2) 開発ルツボ成形機を用いた一体型ルツボ作製と溶解実証

上述のように、新規開発ルツボは特性改善が見られるが、市販CaOルツボ作製と同様の工程で作製すると、成形・焼成時に生じた断層からの割れが発生することがわかり、その解決のため、新型ルツボ成形機を開発した。これを図8に示す。本成形機は型抜きができるルツボの一体成形が容易かつ、確実に行えるものであり、これによって作製した100kg級ルツボ(図9)を用いた溶解試験の結果は、溶鋼汚染が極めて少なく、耐久性が市ルツボの3倍以上あることが実証された。溶解10回以上を重ねたURCルツボ内面を図9に合せて示す。

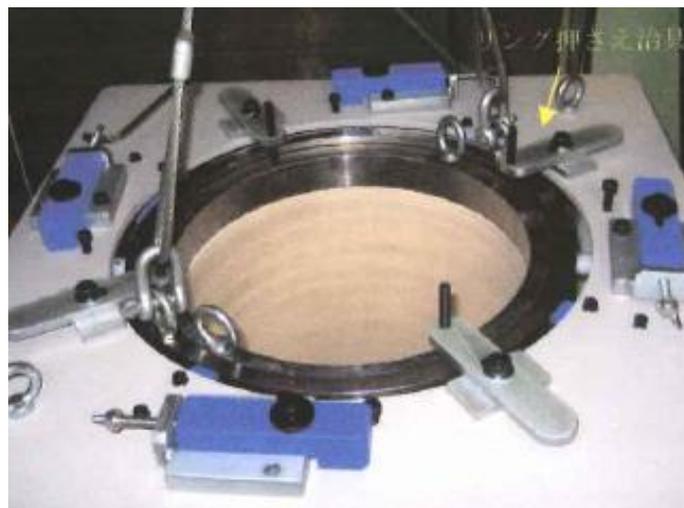


図 8 ルツボ成形機



一体型 URC ルツボ



溶解後のルツボ内面（溶解 10 回後）

図 9 開発した一体型 URC ルツボと溶解後のルツボ内面

（3）大型化対応レンガ構造の開発

高耐久ルツボ・耐火材の開発を進め、市販 CaO ルツボの欠点である水和性が改善され、溶解実験時に溶鉄、溶鋼の CaO ルツボへの差込みと反応が著しく抑制され、汚染がなく、高耐久性を有した URC ルツボが開発され、100kg 級溶解用には本一体型 URC ルツボで実用に供し得ることを実証した。

このため、引き続き、超高純度金属材料の量産化に必要なルツボの大型化研究開発を指向した。ルツボを大型化する場合、耐火材一体型ルツボでは限界があるため、通常図 10 に示すレンガ積み構造を採用する。本プロジェクトでもこの概念を踏襲することとし、先ずレンガ積み構造とした場合の弱点を克服することから始めた。この構造ではレンガの接合部が課題となることは明らかであり、接合部である目地部の検討を行った。図 11 は目地材を模擬した試験片の曲げ強度試験であり、目地材配合を適切に選ぶことによって、当該部の強度は基材部とほぼ同程度との良好な結果が得られた。このため、図 12 に示すレンガ積み構造のモデルを作製し、実際に溶解に用いた結果、2 度の溶解に対して内表面は変化なく、一体型ルツボの経験から、本モデル構造においても耐久性があると推察された。従い、本 URC ルツボは大型化に見通しがあるといえる。

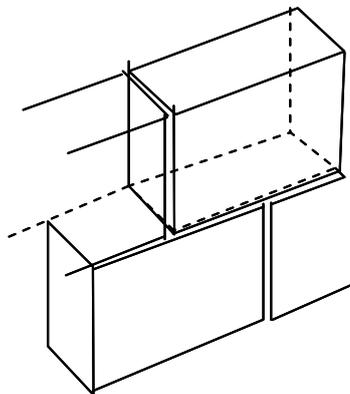
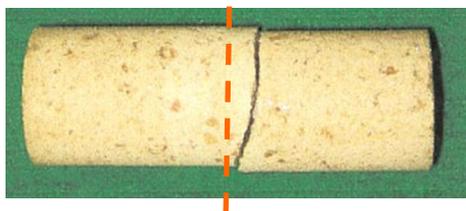


図 10 レンガ積み構造

(a) 強度
CaO ベースの目地材で基材を
接合した後に強度試験を実施



目地（接合部）でなく基材部で破壊



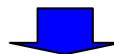
基材に近い曲げ強度を有す

基材	150kgf/cm ²
目地材接合部	110~150kgf/cm ²

(b) 溶鋼の差込防止
溶鋼に対する耐浸透性を
模擬流体を用いて確認



目地（接合部）



基材と同等の溶湯に対する耐浸透性

図 11 目地材試験

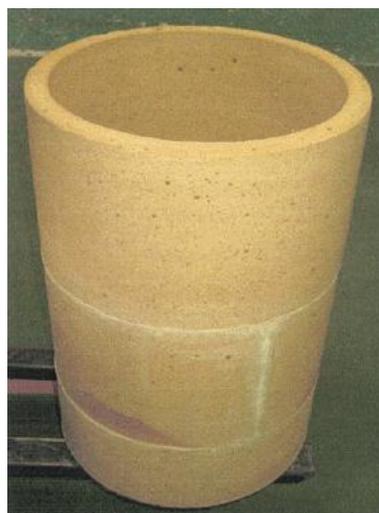


図 12 レンガルツボモデル
(複数の URC ルツボ基材パーツを
目地材を用いて接合して作製)

2. 1. 3 新規精錬技術の開発

本プロジェクト遂行には、量産化を念頭に置いた金属の新規高純度化技術の開発が不可欠である。一般に鉄鋼等の精錬では、転炉による酸化・還元反応等によりいくつかの不純物や非金属介在物を除去し、取鋼精錬等で脱ガス、更には最終成分調整といった段階的な手法が取られている。本プロジェクトではむしろ材料の評価に主眼が置かれるため、これらのすべての段階を追うことは避け、このような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次的な不純物除去及び材料調整段階での溶製・インゴット casting のシ

システムを念頭に、これらの精錬システムに関する要素技術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、後述する高真空誘導溶解炉の仕様に上記精錬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。本来ならば、本高真空誘導溶解炉に水素精錬システムの更に進めたシステム概念を敷設しているが、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、精錬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ものである。上述のように2次的な脱ガス中心の精錬要素としては、水素精錬、アルミニウム精錬、真空精錬等が挙げられ、これら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、CaO ルツボを使用していることから、1次的な脱硫の効果も期待され、汎用炉での試験では効果が見えたケースもあるものの、100kg 級新規開発溶解炉ではフロントエンド側に委ねた格好となっている。

(1) 水素精錬

水素を利用した O、N を始めとするガス成分不純物元素を可能な限り低減する水素精錬技術の適用性に関し基礎的な研究開発を行った。

市販 CaO ルツボを用いた 20kg 汎用 VIM 炉により、電解鉄を水素上吹き溶解、底吹き溶解、上吹き+底吹き溶解することによる水素精錬実験を行った。その結果、図 13 に示すように、Ar ガス 1 気圧中で 40L/min で純水素上吹き溶解した場合、酸素は 17 ppm まで減少し、VIM 炉による鉄の水素精錬は酸素の減少に極めて有効であることを明らかにした。なお、究極としてコールドクルーシブル炉（CC 炉）を用いた超高真空溶解炉による電解鉄の水素上吹き溶解実験（CC 溶解）も実施しており、図 14 に示すように「真空+水素」精錬の効果を明らかにしている。

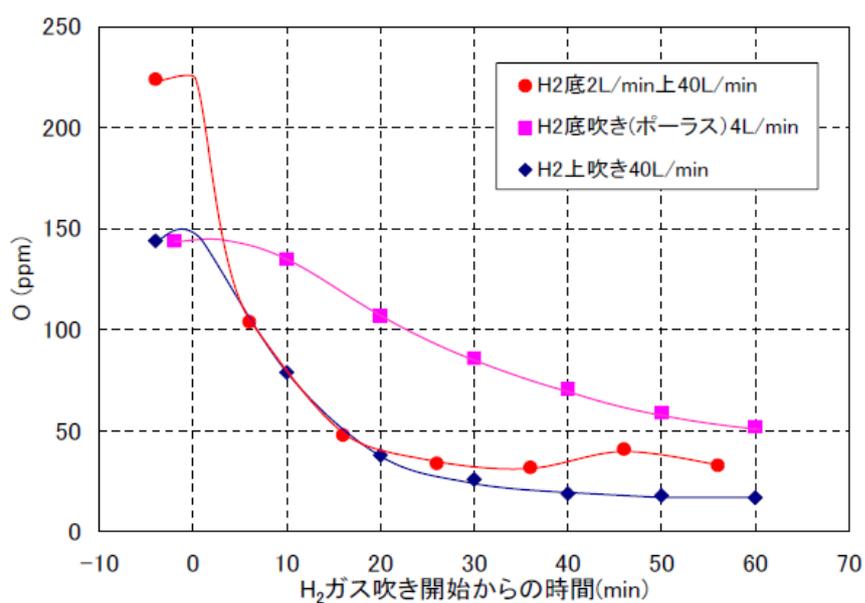


図 13 20kg 汎用 VIM 炉による水素吹き精錬の効果

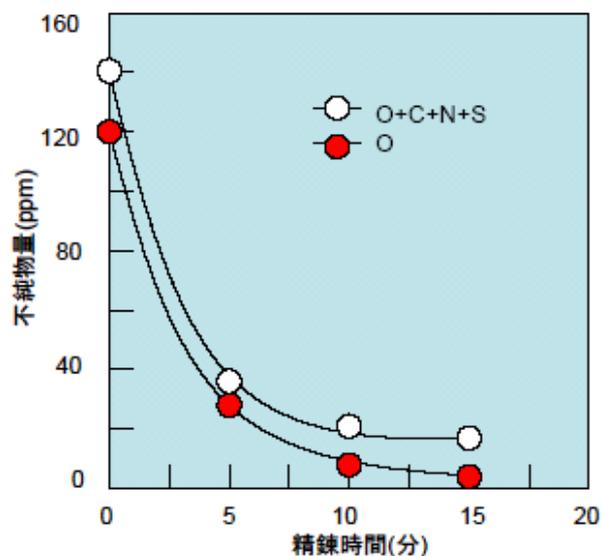


図 14 CC 炉を用いた水素精錬による純鉄の不純物除去効果

(2) アルミニウム精錬

Al を脱酸素剤として用いることは一般にも行われており、ある程度不純物量として低減されているような電解鉄（例えばマイロン SHP など）においてもその効果が現れるかを試験し、有効であることを確認した。この Al 脱酸により O 量の低減が可能で、本プロジェクトで目標とした主要 7 不純物 (C, Si, Mn, P, S, N, O) 総量を 50ppm レベル以下とする溶解試験結果が表 4 に示すように得られており、本精錬は超高純度金属材料の溶製にも有効であることが実証された。

表 4 溶製インゴット中の主要不純物分析値

溶解 No.	主要組成 (%)	不純物 (ppm)							
		C	N	S	P	Si	Mn	O	計
8K02	Fe-30Cr-30Ni-10Mo-2Al	12	6	1	<3	13	2	10	<47
8K05	Fe-18Cr-20Ni-2W-2Mo (T6)	6	6	1	(530)	23	1	10	<47 (P 除く)

(3) 真空精錬

本精錬概念は、例えば O の平衡分圧より十分に小さい高真空下で溶解を実施することにより脱ガスを可能とするもので、溶解時に超高真空の得られるコールドクルーシブル炉などでは図 14 に示したように脱酸が可能である。本プロジェクトにおける高真空溶解はコールドクルーシブル炉程の溶解時真空は得られないため、その脱酸効果は直接的には現れてはいない。しかしながら、

本溶解炉が汎用の真空誘導溶解炉よりは溶解時真空度を上げられる可能性があり、操業安全性の観点から未実施ではあるものの、例えば真空カーボン脱酸などの手法を応用できる可能性が考えられる。

(4) 超高純度金属材料溶製における精錬システム

超高純度金属材料の溶製に欠かせない各種の精錬技術につきその適合性を検討した。本プロジェクトでは、不純物や非金属介在物については既存技術の不純物除去システムをフロントエンドとして、低コスト原料を処理し、処理済原料を超清浄雰囲気の達成・維持できる高真空誘導溶解炉によって不純物濃度が 50ppm レベルの超高純度に仕上げるシステム概念を明らかにした。また、各種精錬技術について検討し、水素精錬においては基礎的に脱酸素効果を確認し、アルミニウム精錬では脱酸検証を行った他、真空精錬による脱ガスの方向性を検討して水素精錬との組合せによる脱ガスや真空カーボン脱酸の概念が今後の実用化システムにおいて適用可能性があることを明らかにしたが、その大型化実証は今後の課題である。また、CaO ルツボについては脱硫効果が期待できるデータも見られるので、その精錬効果の実証は同様に今後の大型化実証に待つものとした。

2. 1. 4 高真空誘導溶解炉の開発

上記 2.1.2, 2.1.3 の開発を迅速有効に進めるために、鉄換算 100kg 溶解及び超清浄雰囲気誘導加熱式溶解精製装置（以下「高真空誘導溶解炉」と称す）を設計、製作し、図 15 に示すように、超高純度金属材料技術研究組合の長崎試験場に設置した。

本溶解炉の設置に伴い高純度鉄に加え各種合金の溶解が可能となった。本溶解炉による合金溶解では、合金成分調整等の観点から溶湯の成分分析が重要であり、そのための溶湯サンプリング装置を付設した他、サンプリングした溶湯の成分分析を迅速に行って成分調整に資するための迅速分析装置も付設した。

(1) 高真空誘導溶解炉の基本仕様と溶解試験

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^{-6} Pa レベルの高真空）が得られるように発想された。本溶解炉の基本仕様、性能、定格は表 5 の通りである。

本溶解炉の設置に伴い高純度鉄に加え各種合金の溶解並びに図 16 に示すようなインゴット製造が可能となり、溶解試験としては 30 回を超える溶解を実施した。この内主要な溶解試験一覧を表 6 に示す。



図15 新しく設計・製作した新型溶解炉（1階正面から見た外観）



図16 溶製したインゴット

表5 高真空誘導溶解炉基本仕様

仕様項目	仕様値及び条件
①溶解能力	1) 電解鉄の溶落時間：100kg/60min 以内 2) 溶解温度：最高 1900℃ 3) 溶解雰囲気：真空、H ₂ 、Ar など
②炉容量	常用 100kg
③システム構成	炉本体、真空系（ディフューザポンプ、ロータリーポンプ、機械式ブースターポンプ、チタンゲッター、配管系）、ガス系、冷却水系、温水系、計測系（Qmass 他）、溶湯サンプリング系等
④溶解金属の処理	鋳型へ電動注湯方式
⑤真空性能	真空槽のみの到達圧力 10 ⁻⁸ Torr 台 真空槽排気時間：760Torr から 5x10 ⁻⁴ Torr まで 60 分以内

表6 長崎試験場高真空誘導溶解炉による主要溶解試験一覧

年度	溶解試験	主要組成	脱酸剤	溶解量	溶解雰囲気	インゴット用途	試験結果概要
18	6K01	Fe		100kg	Arガス	成分分析	検収溶解/機能確認
19	7K01	Fe		100kg	Arガス	断面マクロ観察	溶解成功
	7K02	Fe		100kg	Arガス	成分分析	高純度化試行、≤50ppmレベル未達
	7K03	Fe		100kg	Arガス	成分分析、電磁特性評価	高純度化試行
	7K04	Fe-20Cr	5N-Al	100kg	Arガス	加工性評価用材料溶製	高純度化達成
	7K05	Fe-20Cr-3Mo-2W	5N-Al	100kg	Arガス	溶接性試験等	合金溶製各成分確認
	7K06	Fe-20Cr-3Mo-2W	5N-Al	100kg	Arガス	成分分析	溶湯温度若干上昇、棚吊傾向
	7K07	Fe-20Cr-3Mo-2W	5N-Al	90kg	Arガス	低温域腐食試験等	合金溶製成功
	7K08	Fe-20Cr-2Mo-2W-2Al		90kg	Arガス	過酷環境向耐食合金	合金溶製成功
	7K09	Fe		88kg	真空		ルツボ内凝固(棚吊)
20	8K01	Fe-20Cr-5Mo	5N-Al	90kg	Arガス	カテゴリⅠ材溶製	溶製成功
	8K02	Fe-30Cr-30Ni-2Al		90kg	Arガス	カテゴリⅡ材溶製	溶製成功、7不純物元素合計<47ppm
	8K03	Fe		75kg	真空		ルツボ内凝固(棚吊)
	8K04	Fe		90kg	Arガス		新URCルツボ溶解成功
	8K05	Fe-18Cr-20Ni-2Mo-2W	5N-Al	90kg	Arガス	カテゴリⅢ材溶製(T6)	溶製成功、7不純物元素合計<47ppm
21	9K01	Fe		90kg	Arガス		溶解成功(洗い溶解)
	9K02	Fe		90kg	Arガス		サンプリング機能確認
	9K03	Fe		65kg	真空		真空溶解成功
	9K04	Fe		90kg	Arガス		低コスト原料、高純度化に至らず
	9K05	Fe	6N-Al	90kg	Arガス		微量添加制御実証(P, B)
22	10K01	Fe-18Cr-20Ni-2Mo-2W	6N-Al	90kg	Arガス	カテゴリⅢ材溶製(T6)	溶製成功
	10K02	Fe		90kg	Arガス		レンガルツボ溶解耐性検証
	10K03	Fe		80kg	Arガス	A-iron溶解	

(2) 溶湯サンプリング装置

本プロジェクトで開発した高真空誘導溶解炉には、真空槽内雰囲気（高真空、Ar ガス雰囲気等）を維持しつつ溶解中の溶鋼を自動的にサンプリングできる溶湯サンプリング装置を付設した。本装置により迅速なサンプリングが行えるため、後述する迅速分析装置と相俟って合金溶製時に迅

速に成分分析が行える他、溶湯サンプリング装置チェンバーにはホッパー部を設け、材料添加を可能にし、成分調整、微量組成制御が可能なようにした。溶湯サンプリング装置を図 17 に示す。



[溶湯サンプリング装置概観]



[サンプリング動作状況]

図 17 溶湯サンプリング装置

(3) 迅速分析装置の開発

超高純度金属材料の製造において、溶解プロセスを実用化する場合に、成分組成、含有量の変化若しくは製品の組成の把握が重要である。このためには、成分分析の方法言い換えれば品質管理分析方法を超高純度金属材料開発に適合するものとして開発する必要がある。

このような分析方法について、現在の鉄鋼製造、非鉄金属製造等における品質管理分析法の研究調査を行うとともに、迅速分析方法の適用の可能性について研究調査した。その結果、鉄鋼製造において発光分光分析法が最主要分析法となっており他に比類する分析技術は現在のところない。その理由として、

- ・ C, P, S などの軽元素を含めて、30～40 元素以上の測定が同時に可能。
- ・ 分析所用時間が 20 秒から 30 秒と非常に短い。
- ・ 分析試料の前処理が容易である（表面研磨のみ）。
- ・ 装置の価格が他の装置に比較し安価である。

などがあり、分析コストが非常に安価であり取扱いも簡単である。本プロジェクトで付設した迅速分析装置（スパーク放電発光分光分析装置）を図 18 に示す。

一方、発光分光分析装置の測定能力は本プロジェクトに適用できることが分かったが、適用する検量線作成において、認証標準物質について調査した結果、ほとんどの元素において含有量が

ppm レベルのものがないことがわかったため、更正用の最小濃度試料を開発した。

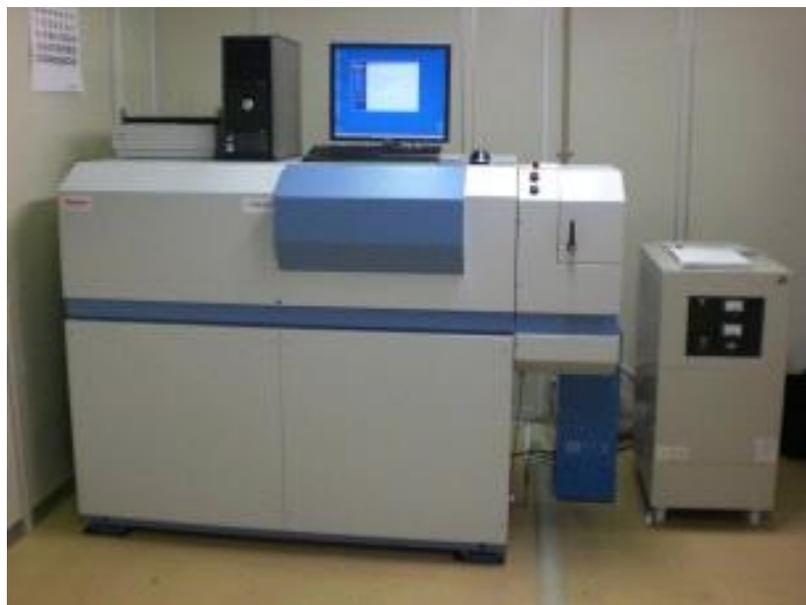


図 18 スパーク放電発光分光分析装置

(4) 超高純度金属材料溶解に用いられる実用溶解炉概念

今回開発した 100kg 級高真空誘導溶解炉は超高純度金属材料の溶製を可能としたものの、量産という観点では課題が抽出された。即ち、本プロジェクトでは量産化溶解炉が具備すべき炉特性を見極める観点から、1 回の溶解において、真空槽内雰囲気清浄化を妨げる（溶解時汚染を引き起こす）因子を究明するため、溶解前に可能な限りガス出しやベイキングといった操作を行い、耐火物等からの汚染を極少化することに成功した反面、溶解時間の長期化につながった。そこで量産化時の溶解炉はこのような前作業をなくすことが求められるが、本プロジェクトでの開発研究の結果、耐火物であっても連続 casting 等の概念を導入し、耐火物を酸素雰囲気に曝さない工夫をすれば十分汚染をなくすことが期待できる。また、量産化のためにはルツボを含め大型化も必要となるため、レンガ積みの構造とする必要がある。このような量産可能な実用の連続 casting システム概念では連続 casting 中はルツボの大气曝露がないため、清浄な溶解環境を維持できる。

2. 1. 5 認証用標準物質の作製

標準物質の登録を目的に、東北大学金属材料研究所の有する優れた設備・技術を用いて超高純度電解鉄を溶製し、認証用標準物質を作製することとした。作製する高純度鉄の目標純度は、世界最高レベルの純度であり、すべての不純物元素について、できるだけ小さくなるように、超高純度化を試みた。このため、東北大学の超高真空コールドクルーシブル溶解炉について、超高真空対応溶解に必要なメンテナンスを注意深く行った後、洗い溶解を兼ねた溶解試験を行うことに

より、本超高純度鉄インゴットの溶製に必要な準備作業を行った上で原料を装荷し、超高真空に引いた後、その雰囲気中で溶解した。溶製したインゴットの外観を図 19 に示す。



図 19 超高真空コールドクルーシブル溶解して作製した超高純度鉄インゴット

溶製した鉄インゴットから、直径位置で垂直方向に 10mm 厚の鉄板を切出し、その上、下段について、それぞれ左端、中央、右端の計 6 箇所から分析試料片を切出し、東北大学・金属材料研究所・材料分析研究コアにおいて極微量化学分析を実施した。C, S, O, N については分析試料数 $n=3$ での平均値、他の元素については分析試料数 $n=2$ での平均値で分析している。

得られた結果を付して本試料を標準物質として国内外の標準認証機関に登録を行うこととしており、超高純度金属材料が国際標準に則した標準物質として世界に認知されることとなり、超高純度金属材料の優れた特性を実用化していく上での大きな布石とできた。

2. 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. 2. 1 超高純度金属材料を使う

超高純度金属材料を作り、この優れた特性を活用するためには、先ず超高純度金属材料の溶製・ casting から始まり、これを工業材料として製品化することを念頭にその材料特性を見極め、その特性を必要とする実社会のニーズとの適合性を評価することが重要である。こうして実際に超高純度合金材料を省資源・省エネルギー、レアメタル枯渇への対応、地球環境問題への対応、安心・安全な社会構築等に役立てるために、これらの社会的ニーズに対応する材料用途を明らかにしつつ、材料開発を進めるとともに、その材料特性を評価し、超高純度化の利点を明らかにすることとした。

(1) 開発対象となる超高純度金属材料

社会的ニーズの観点から超高純度金属材料の開発を捉えた場合、発電プラント用部材の開発が用途も広く適切である。また、合金の主要元素は環境維持に対応し、なるべくレアな金属は使用量を低減するなどの方向性が見えてくる。更に、発電プラント用部材としての特性も耐環境や省資源・省エネルギー等、耐食性や強度等の材料特性の面で、より性能の優れた材料とする必要がある。これらの観点から、開発すべき超高純度金属材料を、実用化までの時間軸を考慮しつつ適切に分類して検討することとした。

(2) 開発材の分類

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、下記の通り分類することとした。しかしながら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、先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。

①カテゴリーⅠ：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途をたてるもの）

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 系を候補材とした。

②カテゴリーⅡ：中期的開発部材（2015年頃に実用化が期待できるもの）

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 系を候補材とした。

③カテゴリーⅢ：長期的開発部材（2030年頃に実用化が期待できるもの）

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。（なお、本材料は東北大学で開発されたものを参照している。）

(3) 開発材の開発目標

上記開発材のそれぞれについて、適用する用途から表7に示す開発目標をたて、これにチャレンジすることとした。

表7 超高純度金属材料の開発目標

カテゴリー		I	II	III
対象製品	分野	耐環境部材	強度部材（中期）	強度部材（長期）
	製品	火力発電プラント	廃棄物発電プラント	先進超々臨界圧火力発電プラント
	部材	煙突ライナー・煙道	過熱器管	過熱器管
	使用温度	~200°C	~400°C	~700°C
材料特性	室温耐力	200MPa 以上	200MPa 以上	—
	伸び	—	30%程度	—
	クリープ破断強度	350~400 で 100MPa 以上	—	70MPa /700°C、10 ⁵ 時間
	耐食性	硫酸露点腐食で SUS316 の 10 倍以上	廃棄物発電環境で SUS310 の 5 倍以上	—
製造性	加工性・溶接性	SUS316 と同程度の薄板加工性・溶接性	SUS310 と同程度のチューブ加工性・溶接性	火 SUS304J1HTB と同程度の加工性・溶接性、既存加工プロセスで製作可能
経済性	想定コスト	1 万円/kg 以下	1 万円/kg 以下	—

2. 2. 2 超高純度金属材料の開発

上記各カテゴリーに属する合金を、本プロジェクトにおいて開発した高真空誘導溶解炉で溶製した超高純度インゴットをもとに試験片を作製し、各種材料特性試験を行った。また、汎用 VIM 炉により溶製した市販純度インゴットからも同様の試験片を作製し、各種材料特性試験を行い、比較した。

(1) カテゴリー I 材の材料特性

超高純度金属材料(母材・溶接継手)のカテゴリー I 材への適用性を検討するため、超高純度 Fe-20Cr-5Mo を中心に、以下の2項目に着目して、機械的性質と耐食性(酸露点腐食)の評価を実施した。

- ・市販純度材に比べてどのように変化するか。
- ・構造用材料(JIS 規格材)に比較して同等かそれ以上の性能を有するか。

(1. 1) 機械的性質

カテゴリー I 材の機械的性質として、引張特性、シャルピー衝撃値等を評価した。

①引張試験

引張試験の結果を図20に示す。室温における引張試験の結果は、超高純度材母材の0.2%耐力はSUS316よりも大きく、伸びはSUS316よりも小さかった。この傾向はオーステナイト鋼とフェライト鋼の機械的性質の相違に起因するものと思われる。また、溶接金属(フルデボ)の機械的性質は母材とほぼ同等である場合が殆どであったが、図21に示すように一部室温で試験した不純物制御材で伸び、絞りが向上する傾向が認められた。

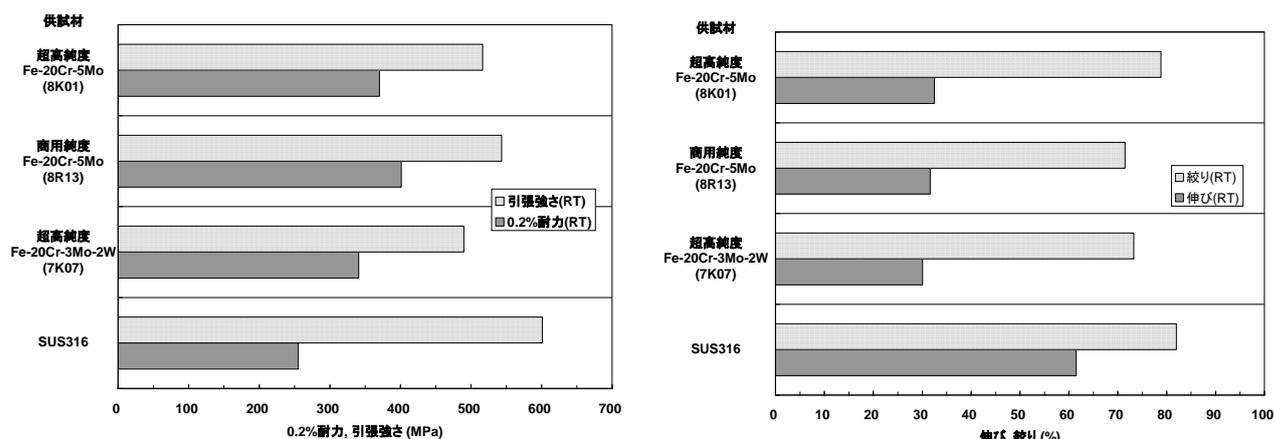


図 20 室温引張試験結果 (母材)

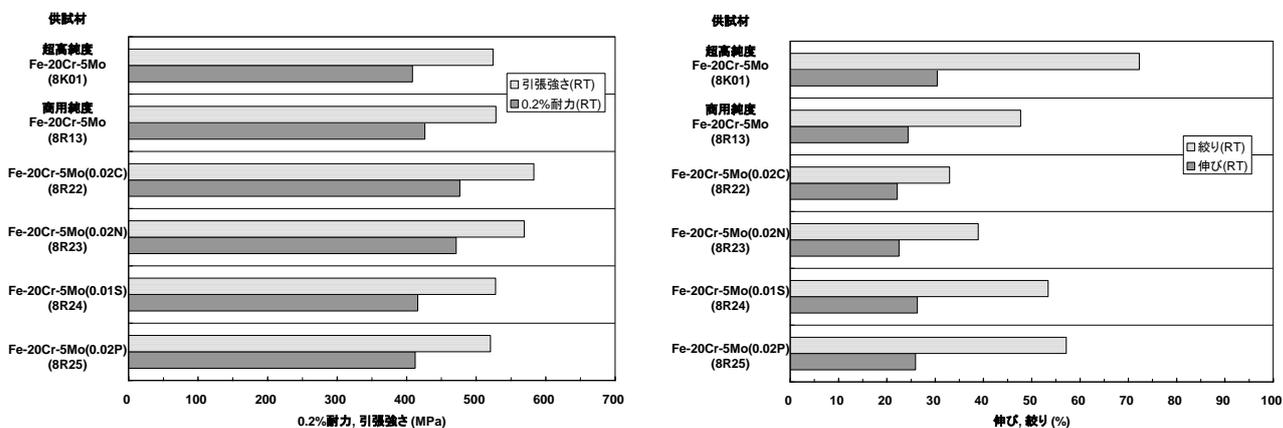


図 21 室温引張試験結果 (溶接金属)

②シャルピー衝撃試験

図 22 に示すように、市販 (商用) 純度 Fe-20Cr-5Mo 鋼母材や不純物制御 Fe-20Cr-5Mo 鋼母材のシャルピー吸収エネルギーは約 50J 程度であったのに対し、超高純度 Fe-20Cr-5Mo 鋼 (8K01) 及び超高純度 Fe-20Cr-3Mo-2W 鋼 (7K07) の母材のシャルピー吸収エネルギーは SUS316

並の高い値を示した。超高純度材、不純物制御材、市販純度材ともに、400℃～450℃で 400 時間熱処理した後の母材のシャルピー吸収エネルギーはいずれも 20 J 以下となった。また、溶接金属のシャルピー吸収エネルギーは、純度によらず 15 J 以下であった。

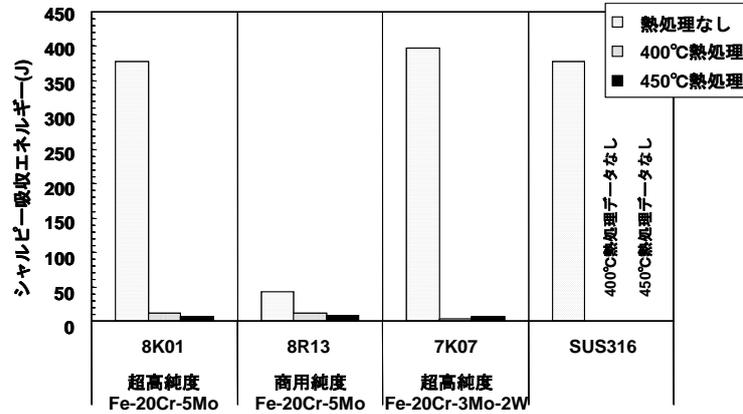


図 22 シャルピー衝撃試験結果 (母材)

(1. 2) 溶接性評価

カテゴリー I 材の溶接性を評価するため、曲げ試験を行い、併せて溶接試験片各部の組織観察を行った。

① 曲げ試験 (表曲げ、裏曲げ)

図23に曲げ試験の結果を示す。超高純度Fe-20Cr-5Mo鋼(8K01)、市販純度Fe-20Cr-5Mo鋼、Fe-20Cr-5Mo(0.01S)鋼、Fe-20Cr-5Mo(0.02P)鋼の表曲げにおいては、曲げ試験で割れが認められなかった。一方、それ以外の供試材ではいずれも割れが認められた。

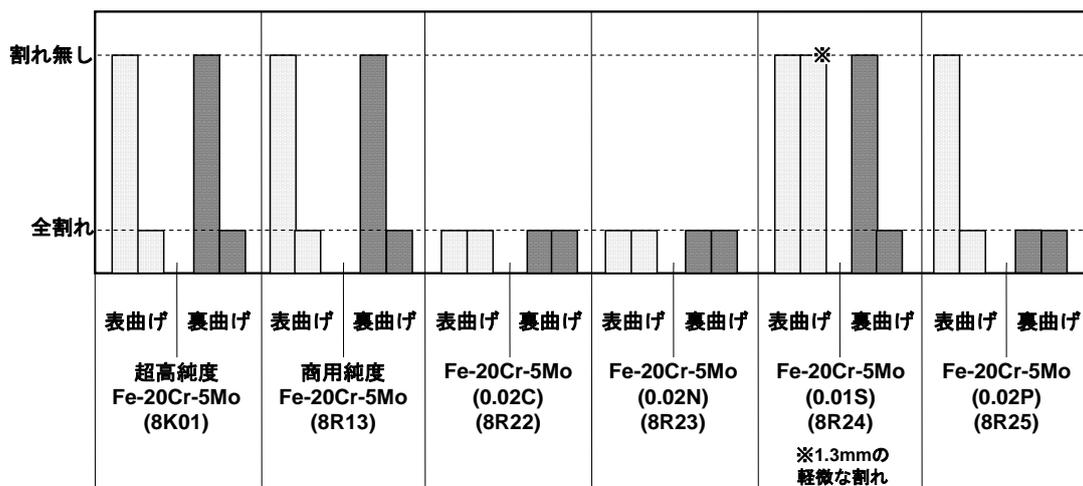
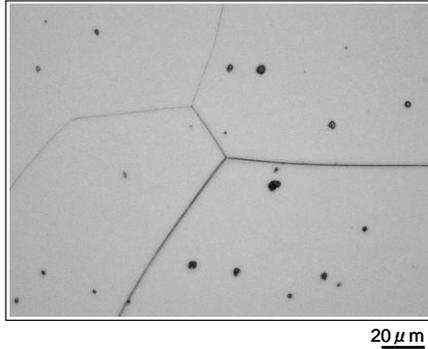
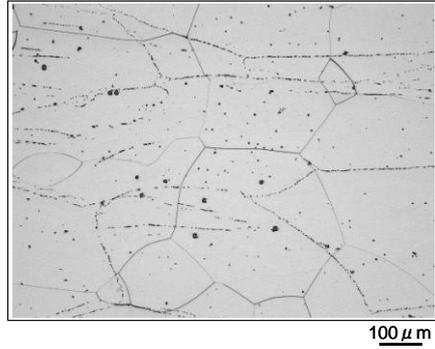


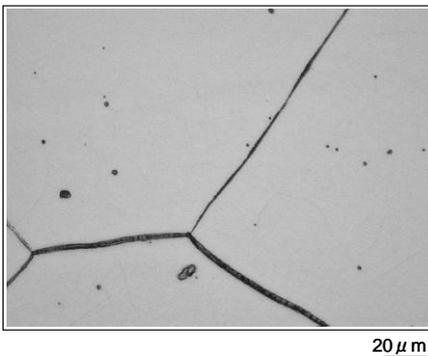
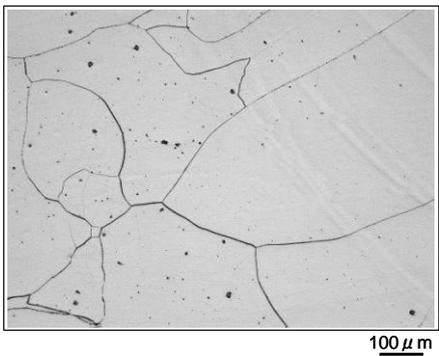
図 23 曲げ試験結果

②金属組織観察(マクロ、ミクロ：溶接金属、溶接熱影響部、母材)

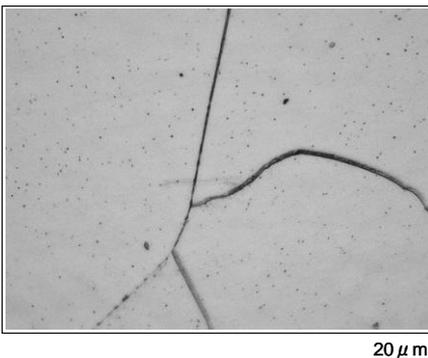
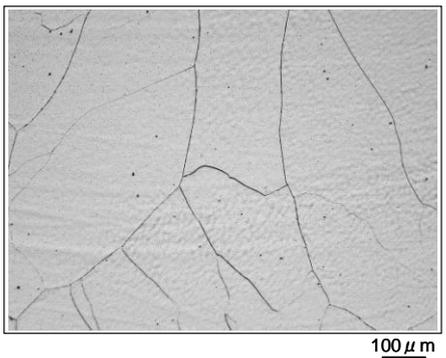
図 24 にミクロ組織観察結果を示す。Fe-20Cr-5Mo 鋼供試材の母材に及び溶融境界線近傍の粒界に析出物等は認められず、また、溶接に伴う顕著な粒成長なども見られなかった。さらに、溶接金属中において、明確なデンドライト組織及び顕著な析出などは認められなかった。



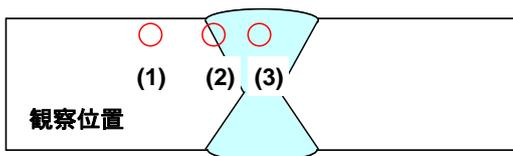
(1) 母材



(2) 溶融境界線近傍



(3) 溶接金属



[観察位置概略]

図 24 ミクロ組織観察結果 (超高純度 Fe-20Cr-5Mo 合金)

③硬さ分布測定(溶接金属、溶接熱影響部、母材)

図 25 に示すように、いずれの供試材においても母材及び溶接金属はほぼ同程度の硬さを示すことが判った。一般に溶接に伴う熱影響によって溶融境界線近傍や溶接金属にひずみが導入されて母材よりも硬くなる傾向が見られるが、特に超高純度材にはその傾向が認められなかった。また、母材のビッカース硬さは SUS316 (母材で約 150Hv 程度) よりも高めの値を示した。この原因として、フェライト組織であることと、Cr 量が多く Ni を含まないことが挙げられる。

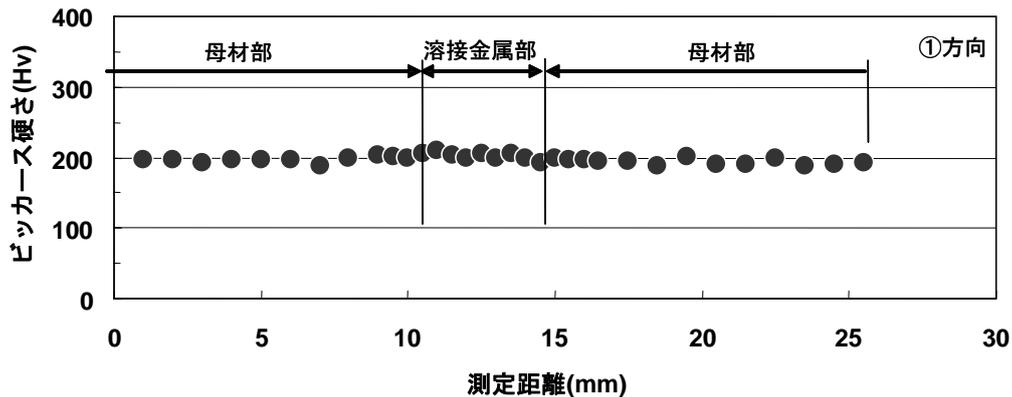


図 25 超高純度 Fe-20Cr-5Mo 合金 (8K01) のビッカース硬さ

(1. 3) 耐食性評価

カテゴリ I 材の耐食性評価のため硫酸露点腐食試験を行った結果は下記の通りである。

①母材の耐食性

硫酸浸漬試験結果の一例を図26 (比較材SUS316又はSUS316Lとの比較) に示す。

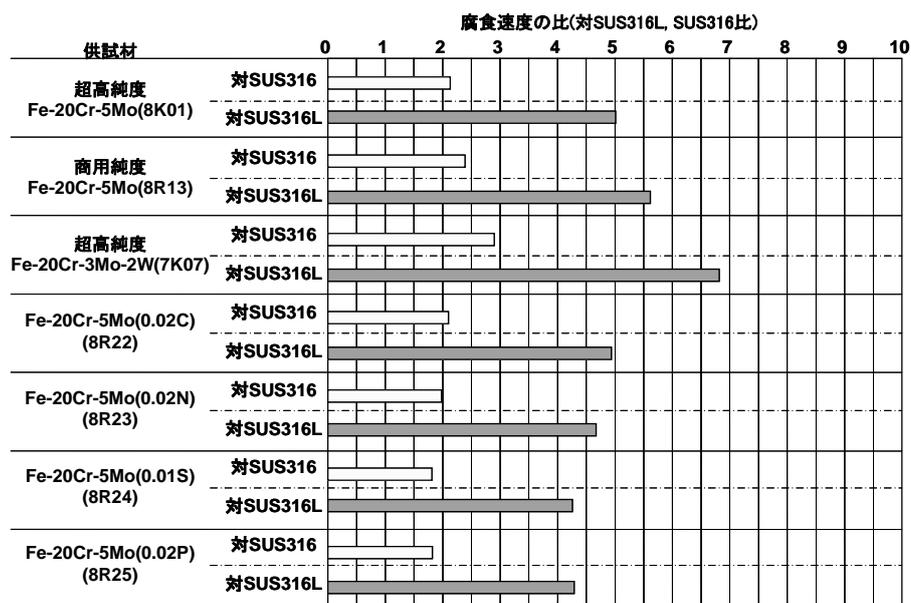


図 26 硫酸浸漬試験結果まとめ (硫酸濃度 60%、温度 120°C)

なお、硫酸中浸漬試験による酸露点腐食特性試験においては、試験条件及び試験時間によって腐食速度の値が異なることが判った。比較材 SUS316L の腐食速度が最も大きくなる硫酸濃度 50%、温度 70℃及び硫酸濃度 60%、温度 120℃においては、例えば図 26 に示したように、浸漬時間 1 時間での Fe-20Cr-5Mo 鋼の耐食性は約 7 倍であった。

②溶接金属の耐食性

溶接金属の耐食性は、母材とほぼ同等であった。

(2) カテゴリーⅡ材の材料特性評価

高純度 30Cr-30Ni-10Mo-2Al 合金(8K02)の廃棄物発電ボイラ用過熱器管材としての特性を、市販純度材 30Cr-30Ni-10Mo-2Al 合金、火 SUS310J1 (HR3C)と比較して評価した。得られた主な結果は以下の通りであり、課題が抽出され、延性・靱性改善が重要であることがわかった。

(2. 1) 機械的性質

①室温耐力、伸び

室温の 0.2%耐力は約 600MPa であり、目標の 200MPa を超えた。ただし、室温の伸びは 0.33% であり、目標の 30%に達しなかった。

②シャルピー衝撃値

シャルピー衝撃値は、400℃・400 時間の恒温時効の有無にかかわらず 2~4J/cm² と低い値であり、時効後のシャルピー衝撃値目標とした 10J/cm²に達しなかった。

③ビッカース硬さ

ビッカース硬さは、400℃・400 時間の恒温時効の有無にかかわらず約 370Hv 前後であり、変化は見られなかった。

④金属組織観察

高純度 30Cr-30Ni-10Mo-2Al 合金のマイクロ組織観察結果を図 27 に示す。同図に明らかなように、マイクロ組織は 2 相組織となっており、低延性、低靱性の要因と考えられる。

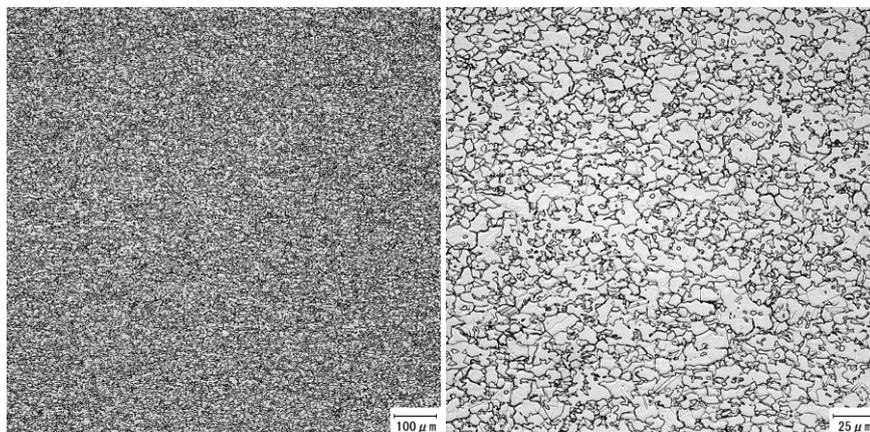


図 27 高純度 Fe-30Cr-30Ni-10Mo-2Al 合金のマイクロ組織

(2. 2) 耐食性評価

カテゴリーⅡ材の耐食性評価のため、塩塗布試験を行った。結果を表8に示す。この結果、同表に示す通り、供試材（高純度及び市販純度 30Cr-30Ni-10Mo-2Al 合金）と比較材（火 SUS310J1）の中では、市販（普通）純度材の減肉量が最も少ない結果であった。但し、市販純度材では合金内部に内部侵食層が生成しており（図28）、その最大深さは129 μ に達していた。これより耐食性としては市販純度材は高純度材よりスケール保護性が低下していると判断された。なお、高純度材のSUS310に対する耐食性は550 $^{\circ}$ Cの脱スケール後の質量変化基準で3.3倍程度であった。

表8 カテゴリーⅡ材塩塗布試験（550 $^{\circ}$ C・100時間）

材料	符号	番号	初期寸法(mm)			表面積 (cm ²)	重量		腐食減量		SUS310に対する耐食性		減肉量 (μ m)	
			t	w	?		試験前	試験後	(g)	mg/cm ²	平均	結果		目標
高純度30Cr-30Ni-10Mo-2Al合金	8K02	1	2.915	14.938	14.925	6.20	4.9980	4.7861	0.2119	34.2	36.7	3.3	5以上	46
		2	2.941	14.917	14.924	6.21	5.0694	—	—	—				
		3	2.952	14.912	14.933	6.22	5.0768	4.8335	0.2433	39.1				
普通純度30Cr-30Ni-10Mo-2Al合金	8R08	1	2.949	14.925	14.853	6.19	5.0497	4.9051	0.1446	23.4	23.0	5.2	29 (129)	
		2	2.949	14.844	14.931	6.19	5.0693	—	—	—				
		3	2.946	14.717	14.892	6.13	4.9985	4.8596	0.1389	22.7				
火SUS310J1	HR3C	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	5.2660	4.6570	0.6090	98.2				

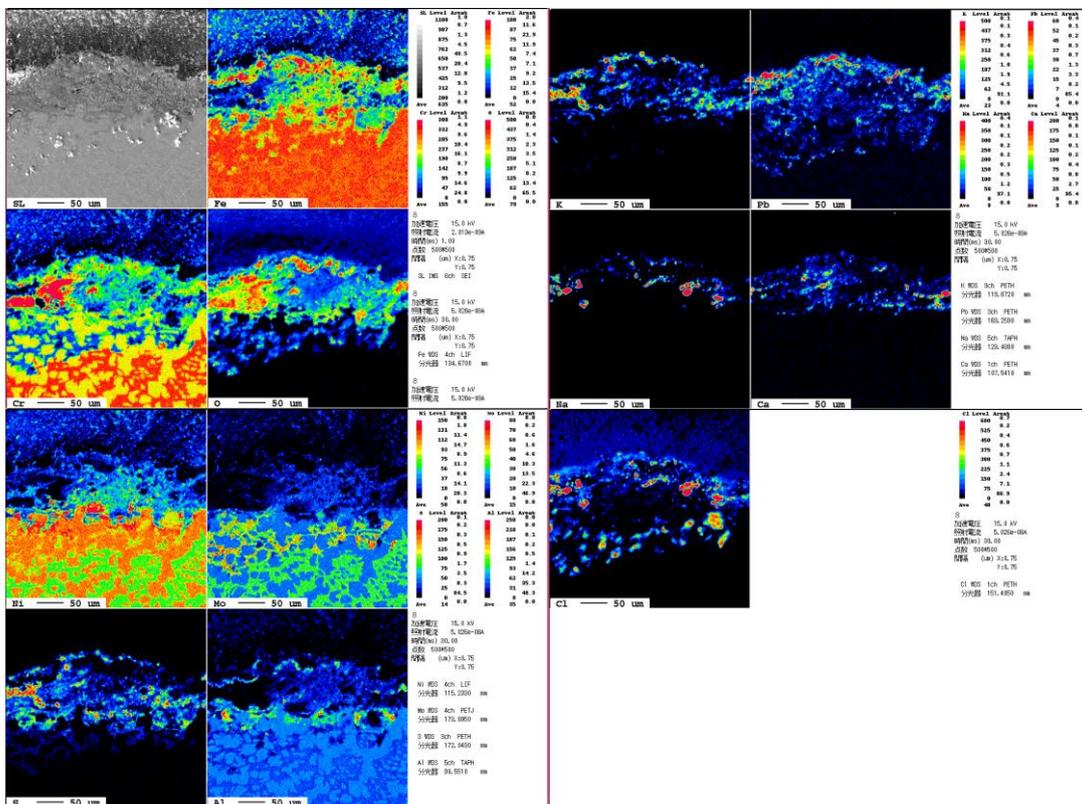


図28 市販純度カテゴリーⅡ材のスケール断面 EPMA 面分析結果

(3) カテゴリーⅢ材の材料特性評価

カテゴリーⅢの候補材として Fe-Cr-Ni 系合金を数種選択し、先進超々臨界圧火力発電等を想定した長期耐高温高強度部材を開発するとともに、その高強度化機構を検討するとともに、各種材料特性を実用合金と比較評価した。その中から、有望候補材についてより詳細に各種材料特性を評価した。得られた結果は以下の通りである。

(3. 1) 新規高強度材の開発と基礎的材料特性

高純度 Fe-18Cr-20Ni 系の合金について成分元素、添加元素をパラメータとして数種を選択し、材料特性を市販 SUS316L と比較評価した。これらの材料で高温高強度という観点で有望な Fe-18Cr-20Ni-2Mo-2W 系合金 をベースに材料特性を評価した。基礎的材料特性試験の結果は下記の通り。

- ①カテゴリーⅢ候補材の室温引張強度は 820MPa と高く、 -196°C の衝撃値は $300\text{J}/\text{cm}^2$ 程度と優れた靱性を有している。
- ②カテゴリーⅢ候補材の鋭敏化材の耐応力腐食割れ性は市販 SUS316L より大幅に優れている。
- ③カテゴリーⅢ候補材の 1000°C の耐酸化特性は市販 SUS316L よりも大幅に優れている。

(3. 2) 高強度化機構の検討

超高純度金属材料では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化を狙うことを基本としている。以下にカテゴリーⅢ候補材における高強度化機構の要点を記す。

- ①カテゴリーⅢ候補材冷間加工材は 750°C 程度で短時間時効することで時効硬化するが、高温長時間時効すると軟化しやすい。
- ②カテゴリーⅢ候補材の冷間加工材の 750°C の短時間時効材では、加工ひずみが蓄積した部位より微細な析出物が析出することで高強度化したことが推定された。図 29 に析出物の透過電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。

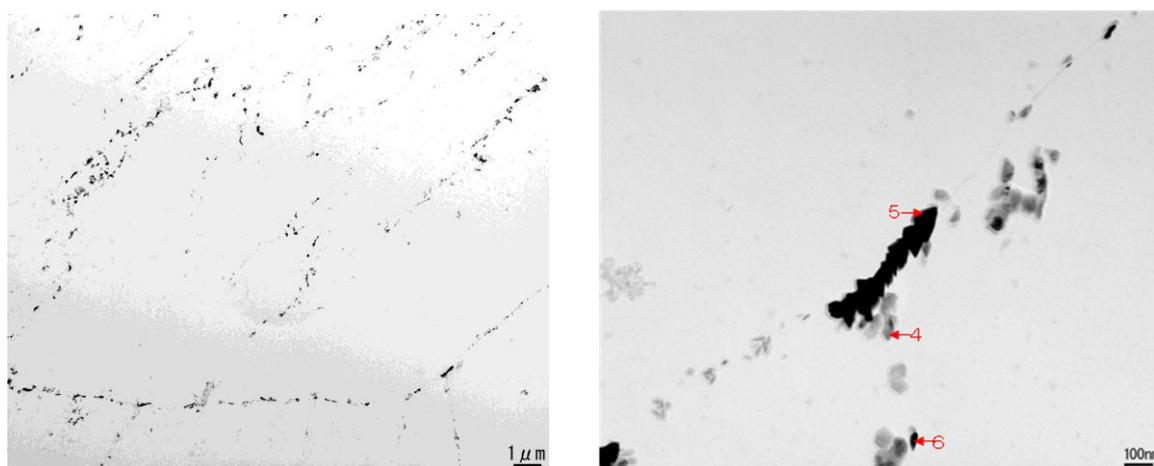


図 29 カテゴリーⅢ候補材時効材の析出物の TEM 像

(3. 3) カテゴリーⅢ候補材の材料特性評価

カテゴリーⅢ候補材が長期的高温高強度部材として有望との基礎研究を踏まえ、最終年度に発電プラント用部材としての適用性を見極めるために、材料特性を評価することとし、主たる特性としてクリープ強度につき調査するとともに、プラント用部材としての適合性の観点から溶接性評価を行った。また、併せて組織観察により組織安定性を評価した。以下にその主な結果を記す。

①クリープ強度試験

カテゴリーⅢ候補材を先進的超々臨界圧火力発電プラント用構造部材として用いることを想定して、その適合性を見通すために、700℃、10⁵時間でのクリープ破断強度が70MPa以上あるかをプロジェクト終了時点でのデータからの外挿により推定することとした。このため、最終年度内で可能であった5000時間のクリープ破断データにより評価した。図30は得られたデータをラーソンミラーパラメータ法によりプロットしたもので、高純度材、市販純度材について時効熱処理材、固溶化まま材、溶接熱影響部(HAZ)再現材などを示している。この結果、高純度材、市販純度材ともに母材の時効熱処理材では100MPa以上であると推定される他、溶接熱影響部においても70MPa以上と推定され、目標を達成すると見通せた。

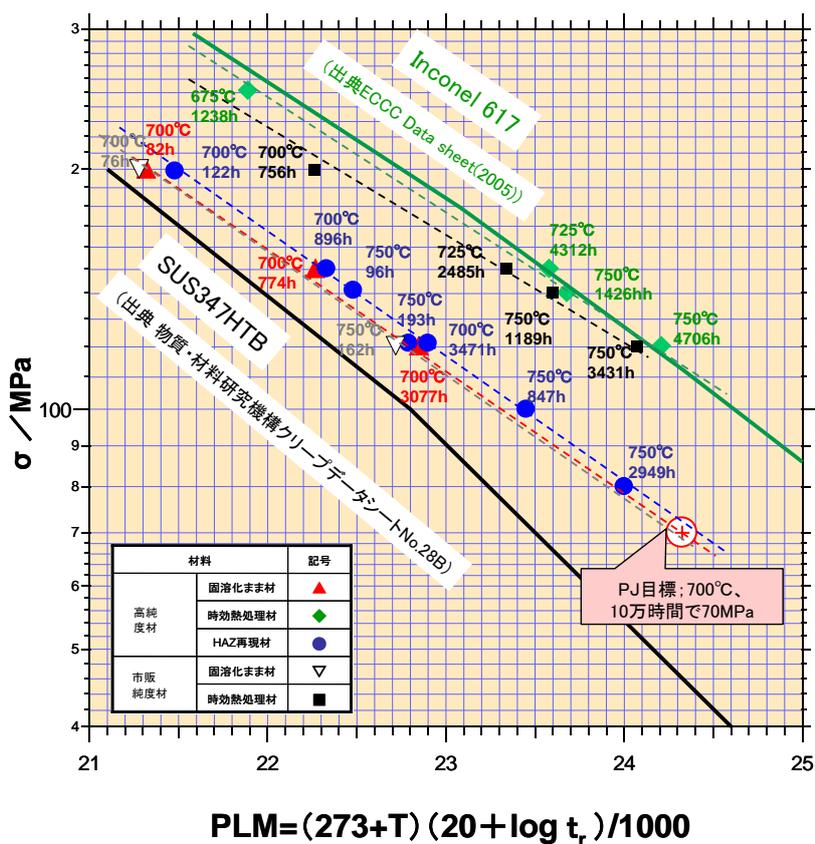


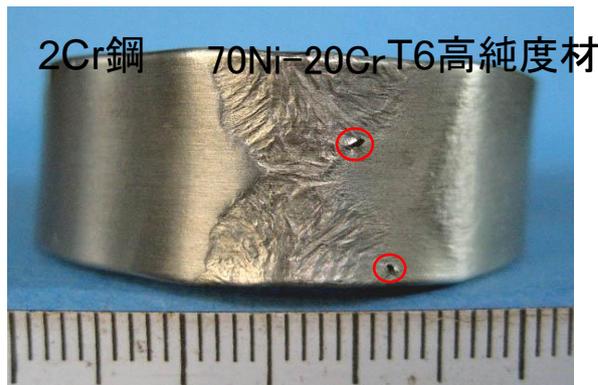
図30 カテゴリーⅢ候補材のクリープ破断強度

②溶接性評価

カテゴリーⅢ候補材をベースに、共材、異材を含めた各種溶接継手試験片を作製し、継手品質評価試験並びにトランスバレストレイン試験を行い、溶接性及び溶接割れ感受性を評価した。曲げ試験結果を図 31 に、バレストレイン試験結果を図 32 に示す。なお、溶接継手作製時には各図に示すアルゴンガス封入シールドボックスを用いて溶接部への不純物混入を抑制した。



[丸棒突合せ溶接用シールドボックス]



[丸棒突合せ溶接継手の曲げ試験後の外観]

図 31 丸棒突合せ溶接継手の曲げ試験結果



[バレストレイン試験片溶接用シールドボックス]



[バレストレイン試験片]

図 32 トランスバレストレイン試験結果

溶接性評価の結果は、共材、異材ともに溶接部に割れが発生する傾向が示され、溶接割れ感受性が高いことがわかった。

③組織安定性評価

カテゴリーⅢ候補材を発電プラント用構造部材として用いるには、その材料特性が長期に亘って安定的であるかを見通す必要があるため、限られた時間での推定として、熱的平衡計算による金属組織内析出物の推定と、組織観察による推定を行った。後者では溶接割れ感受性が高いことを踏まえ、その因子を併せて考察することとした。計算プログラム Thermo-Calc による平衡計算の例を図 33 に、透過電子顕微鏡 (TEM) による組織観察結果の例を図 34 に

示す。これらの図並びに前述した基礎的研究の結果から、添加元素による低融点共晶の発生が推定され、溶接性改善の課題とした。

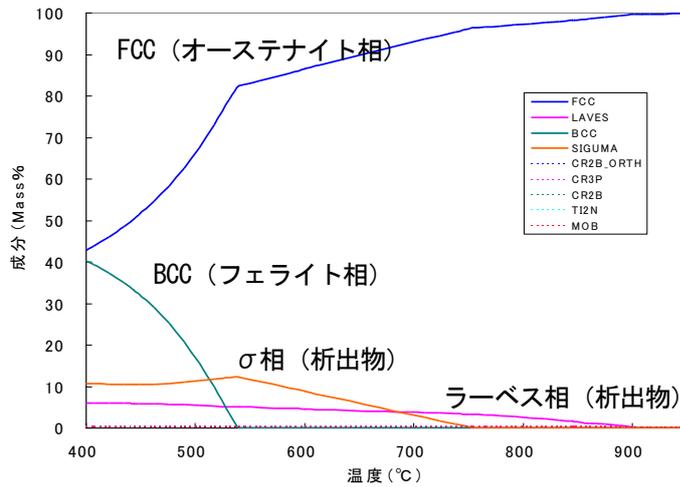


図 33 Thermo-Calc による高純度カテゴリーⅢ候補材の平衡計算結果



図 34 高純度カテゴリーⅢ候補材の TEM 像

④カテゴリーⅢ候補材のプラント適合性まとめ

上述した各試験結果から、溶接性に課題があるものの高温高強度を維持できる可能性があることがわかった。一方で、超高純度金属材料の強度強化メカニズムは実証されており、添加元素を適切に選定することで溶接性を改善することができれば有望な材料となり得る。また、高強度の利点を活かし、溶接不要部位に用いることも考えられ、総じて今後の材料開発に資することができたと考えられる。

(4) 高純度化効果と不純物の影響

金属材料の不純物濃度を低減し、材料が本来有していると考えられる優れた特性を引き出すことは、単元素金属では確認されており、合金にもそのような特性が発現することが期待されている。図 35 はその代表的なもので、オーステナイト系ステンレス鋼において高純度材が市販純度材よりも高靱性となることを示している。

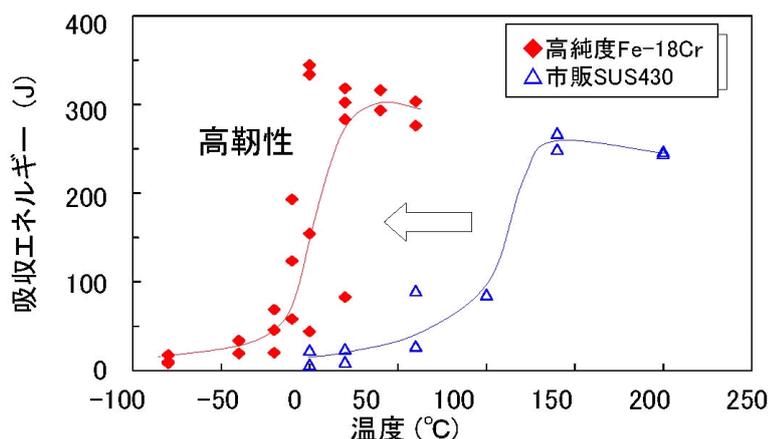


図 35 高純度化によるシャルピー衝撃特性の改善

一方、合金をその機能を目的として開発する場合に、不純物ともなり得る元素添加により特性向上を期待したり、加工方法によって部材としての機能向上を期待する場合も多く、不純物の効果はこのようなメカニズムの中でどのように発揮されるのかを検討した。多くの場合、合金作製メカニズムの効果が顕著であるのは否めないものの、不純物効果が現れるケースも見出され、超高純度金属の在り方に資するデータが得られたと考えられる。

(4. 1) カテゴリー I 材

カテゴリー I 材の各種材料特性試験に対し、純度の効果若しくは不純物の影響の観点から考察すると以下の通りであった。

①図 36 に示すように純度の効果は、シャルピー衝撃特性の向上に見られた。その他の機械的性質については、母材、溶接金属とも純度の影響は明確にならなかった。

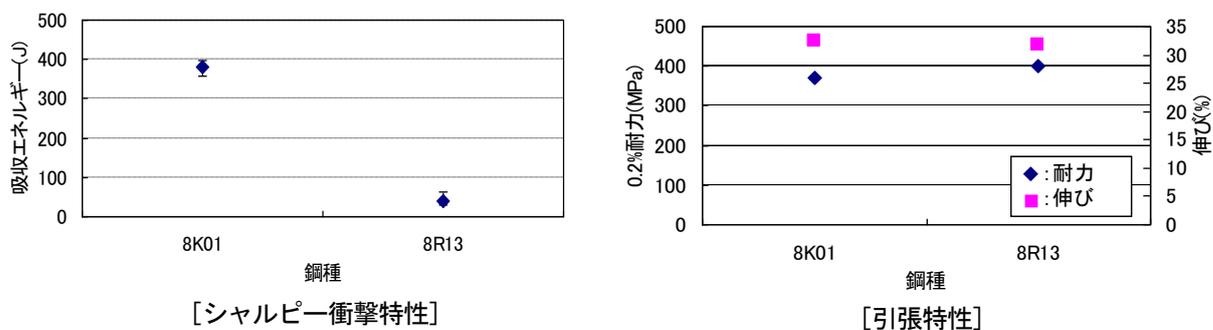


図 36 カテゴリー I 材の機械的性質における純度効果

- ②母材及び溶接金属の耐食性に及ぼす超高純度化の効果は明確にならなかった。
 ③微量不純物添加効果としては、図 37 に示すように、市販純度材 8R22 (C 添加)、8R23 (N 添加)、8R24 (S 添加)、8R25 (P 添加) での特性の変化が認められる。

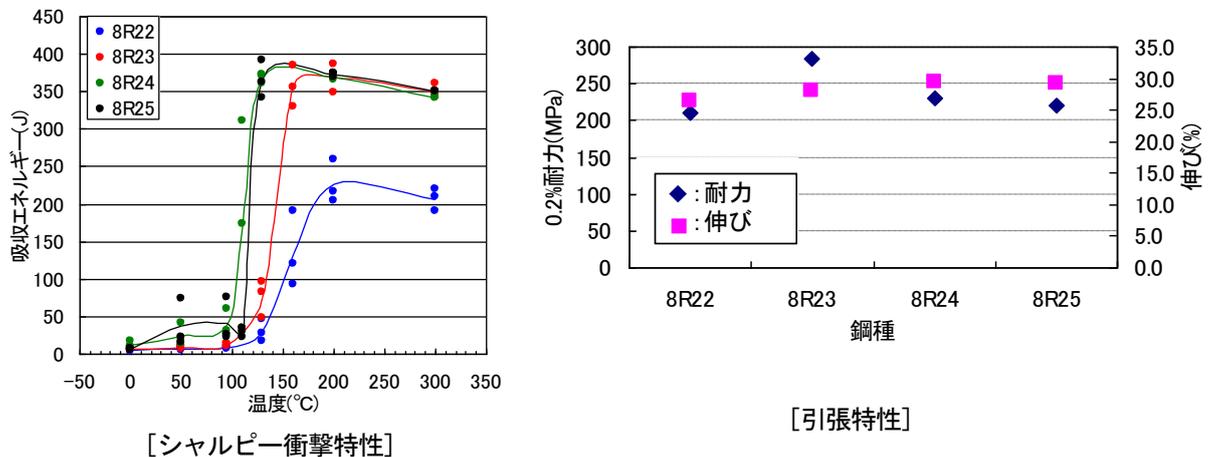


図 37 カテゴリー I 材の特性に及ぼす不純物効果

- ④Fe-20Cr-5Mo の溶接継手の健全性に及ぼす超高純度化の効果は顕著でなく、むしろ微量の S 添加によって溶接継手の健全性が改良される可能性 (図 23) が示唆された。
 ⑤溶接継手のマイクロ組織に及ぼす超高純度化の効果は明確にならなかったものの、溶接継手の硬さ分布に及ぼす超高純度化の効果として、溶接熱影響部の硬さ上昇の抑制 (図 25) が認められた。

(4. 2) カテゴリー II 材

カテゴリー II 材の各種材料特性試験に対する純度の効果若しくは不純物の影響は以下の通り。
 ①純度効果としては、図 38 に示すように引張特性において高純度材の室温耐力の向上が見られる (伸びは減少)。また、高純度材に比べ市販純度材のビッカース硬さは恒温時効によって硬化する傾向を示した。

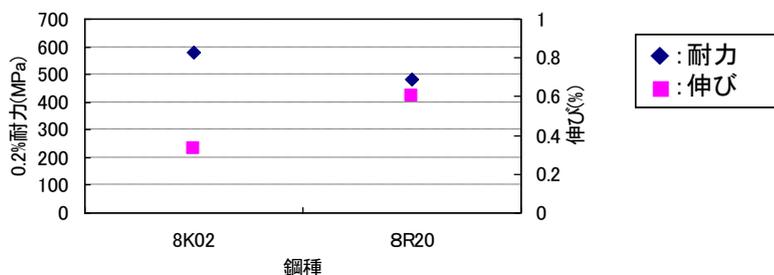


図 38 カテゴリー II 材の純度効果の例 (引張特性)

②微量不純物添加効果としては、図 39 に示すように、市販純度材 8R26、8R27（無添加）、8R28（C 添加）、8R29（N 添加）、8R30（S 添加）、8R31（P 添加）、での特性の変化が認められる。

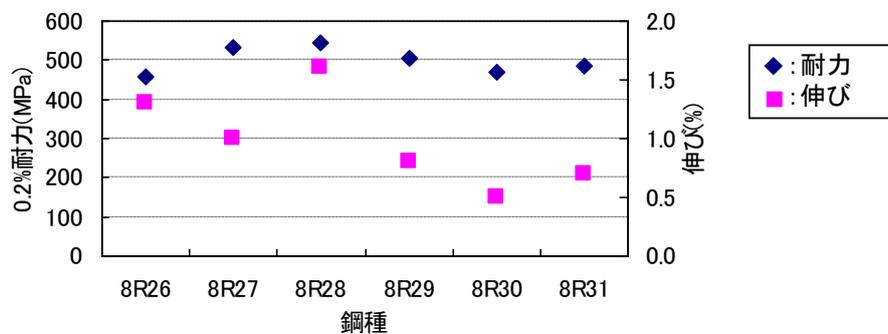


図 39 カテゴリーⅡ材の不純物添加効果の例（引張特性）

（4. 3）カテゴリーⅢ材

カテゴリーⅢ材の各種材料特性に対する純度効果は明確には現れていない。

2. 2. 3 部材製造技術開発

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のかを検討するため、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き検討した。

(1) 部材製造技術開発

開発した超高純度金属を発電プラント用部材の素材として実用化する上でさまざまな技術開発が必要となる。本プロジェクトの初期には、板材、シームレスチューブ、型鍛造翼並びにTIG溶加材等の試作と製造技術開発を実施し、プロジェクトの進展に伴い、開発材料に合わせた素材製造を検討するなどプロジェクトの進捗に合わせた開発を行った。それらの成果は次の通りである。

① 実機を模擬した圧延ラインで、Fe-18Crの板厚1mm～25mmの板材製造技術を開発した(図40)。

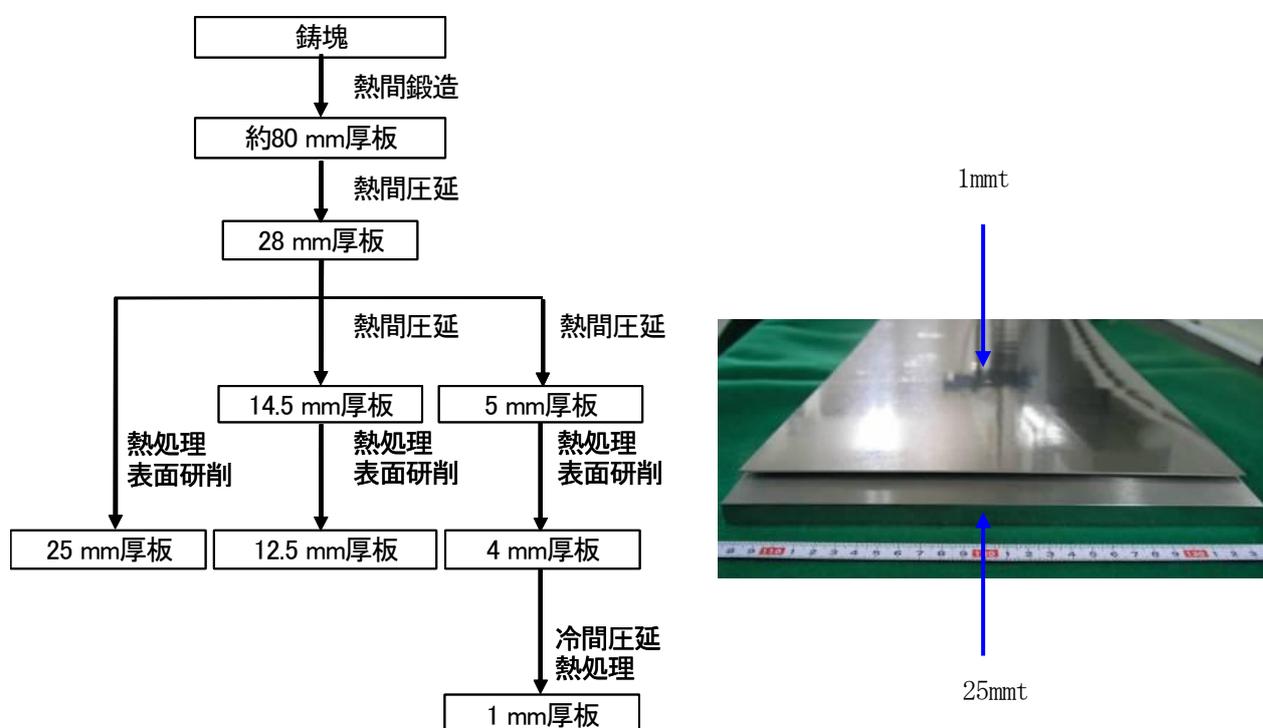


図40 実機模擬ラインでの板材製造試験結果

②上記に対し、カテゴリⅢ材などでは強度強化加工（鍛造、圧延）も実施している。

③各種 Fe-Cr 系合金において、シームレスチューブの製造技術、高周波曲げ技術並びに鍛造翼の製造技術を開発した(図41)。



試作シームレスチューブ



高周波曲げ後のシームレスチューブ



試作型鍛造翼

図 41 シームレスチューブと型鍛造翼の製造試験結果

④超高純度金属材料溶接において、不純物の混入の少ない TIG 溶加材の製造技術を開発した(図 42)。



φ 1.0mm TIG ワイヤ



φ 2.4mm TIG 溶加棒

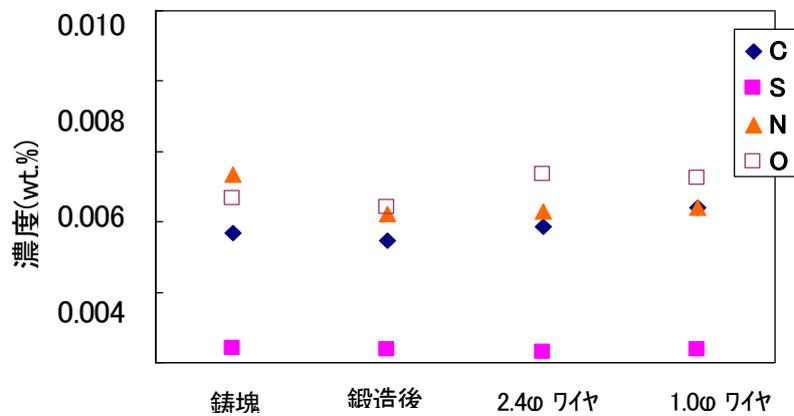


図 42 TIG 溶解材の製造試験結果と不純物濃度変化

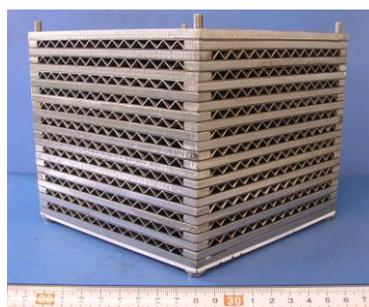
(2) 部品製造技術

耐熱薄板部材の熱交換器及びベローズを試作し、その製造性及び実用特性を市販 SUS316L と比較した。成果は次の通りである。

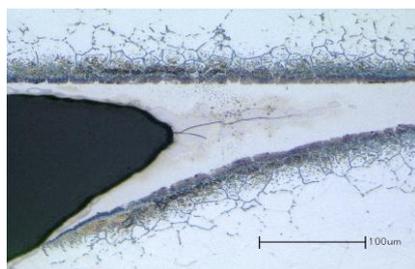
①Fe-20Cr 系合金の熱交換器としての製造性は良好であり、ろう付け部の耐久性は市販 SUS316L よりも優れている。(図 43)。



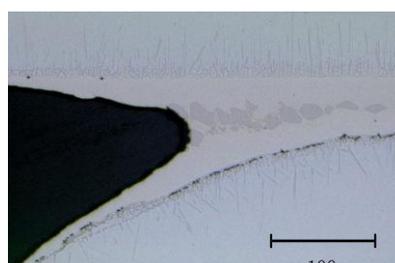
Fe-20Cr-3Mo-2W の波板



Fe-20Cr-3Mo-2W 製熱交換器



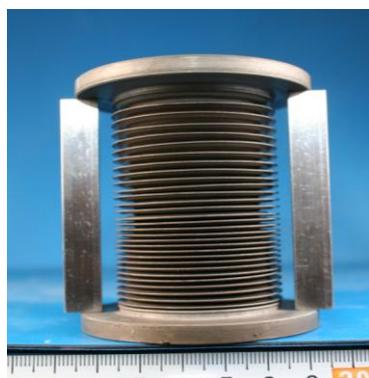
市販 SUS316L のろう付け部



Fe-20Cr-3Mo-2W のろう付け部

図 43 熱交換器としての製造性評価結果

②Fe-25Cr 系合金のベローズとしての製造性は良好であり、溶接部の組織変化はほとんどない。また、ベローズの 1000℃酸化試験の結果、Fe-25Cr-3Al 合金の耐久性は市販 SUS316L よりも良好であり、1000 時間経過後もバネ定数変化は 5.55N/mm→6.2N/mm と小さかった ((図 44)。



Fe-25Cr 系合金



市販 SUS316L

図 44 ベローズの製造と耐酸化試験結果

(3) 溶接技術開発

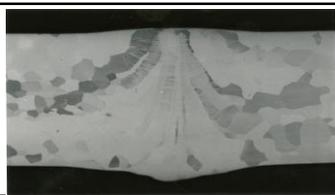
超高純度 Fe-18Cr 合金の板材及び TIG 溶加材を用い、TIG 溶接技術並びに狭開先 TIG 溶接技術を開発した。即ち、Ar ガスを封入できるシールドボックス使用により、不純物の混入の少ない TIG 溶接技術を開発した (図 45)。また、狭開先 TIG 溶接技術を開発し、溶接部の組織変化が同成分の市販 SUS430 に比べ、著しく小さいことを確認した (表 9)。

試験片番号	ノズルシールド	シールドボックス	N	O	W
6J02-4-1	10L/min	無し	51~52	59~64	6.1
6J02-4-2	20L/min	無し	約49	39~47	2.6
6J02-4-3	20L/min	有り	約40	37~40	<1



図 45 TIG 溶接でのシールド条件と不純物濃度の関係

表 9 狭開先 TIG 溶接条件と断面組織の市販 SUS430 との比較

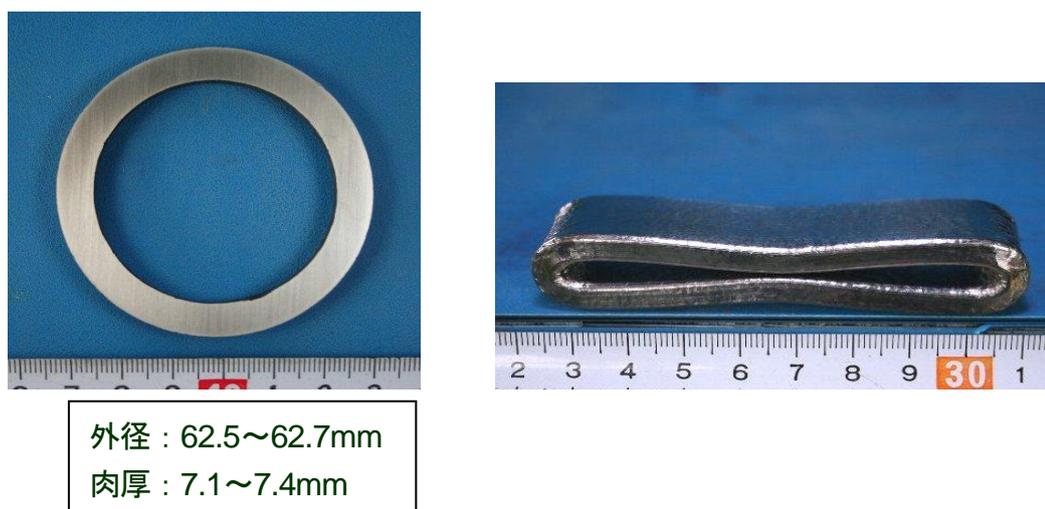
供試材	溶接条件				検査結果		断面組織
	電流(A)	電圧(V)	溶接速度 (cm/min)	予熱・後熱	浸透探傷	放射線透過	
高純度Fe-18Cr	160~190	9.5~10	8~9.5	なし	合格	合格	
市販SUS430	160~190	9.5~10	8~9.5	あり	合格	合格	

2mm

(4) 実用特性評価試験

(4. 1) 試作素材の特性評価

試作した各種素材の特性評価を実施した結果、Fe-18Cr 合金板材の靱性は同成分の市販 SUS430 より良好であり、シャルピー衝撃試験での脆性／延性遷移温度は 100℃以上低い。また、Fe-20Cr 系合金シームレスチューブの形状精度及び機械的特性は良好である (図 46)。



試験温度 (°C)	引張試験結果				シャルピー衝撃試験結果
	耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	衝撃値 (J/mm ²)
室温	333	457	35.3	63.7	305、 365、 363
300	227	407	33.6	71.8	
500	233	371	35.4	62.2	
600	172	263	33.9	64.3	
700	131	149	33.2	84.5	

図 46 Fe-20Cr 系合金シームレスチューブの特性評価結果

(4. 2) 溶接継手の特性評価

試作した TIG 及び狭開先 TIG 溶接継手の特性評価試験を実施した結果、Fe-18Cr 合金の TIG 溶接継手の特性は、同一シールド条件で溶接した市販 SUS430 より良好であり、継手の引張、衝撃、並びに曲げ試験ではるかに優れた特性が得られた (表 10)。また、Fe-18Cr 合金の狭開先 TIG 溶接継手の特性は、予熱・後熱を実施していないのにもかかわらず、これを実施した市販 SUS430 より著しく良好であり、継手の引張、衝撃並びに曲げ試験ではるかに優れた特性が得られた (表 11)。

表 10 Fe-18Cr と市販 SUS430 の TIG 溶接継手の継手試験結果

供試材	シールド 方法	継手強度試験結果						
		引張試験		シャルピー衝撃試験			曲げ試験	
				平均吸収エネルギー(J)				
		強度 (N/mm ²)	破断位置	溶金ノッチ	HAZ ノッチ	母材ノッチ	表曲げ	裏曲げ
高純度 Fe-18Cr	Ar シールド ボックス	357	母材	127	154	296	合格	合格
市販 SUS430	Ar シールド ボックス	358	溶金	6	5	28	不合格	不合格

表 11 Fe-18Cr と市販 SUS430 の狭開先 TIG 溶接継手の継手試験結果

	引張試験			曲げ試験				衝撃試験	
	No.	引張強さ (N/mm ²)	破断位置	No.	試験片	曲げ角度(°)	割れの有無	試験片	衝撃値(3回平均) (J/cm ²)
Fe-18Cr (高純度材)	1-1	371	母材	2-1	表曲げ	180	無	HAZ	192
				2-2		180	無		
	1-2	333	母材	3-1	裏曲げ	61.5	5mm以下の 割れ発生	DEPO	152
				3-2		180	無		
SUS430	1-1	443	溶接部	2-1	表曲げ	180	無	HAZ	11
				2-2		180	無		
	1-2	446	溶接部	3-1	裏曲げ	21.0	全割れ	DEPO	9
				3-2		22.5	全割れ		

2. 2. 4 実プラントによる実用特性評価試験

超高純度金属材料が実用に供し得ることを実証するため、実際のプラントに供試材を装荷し、腐食環境下での材料特性変化を調査することとした。このため、供試材としてカテゴリー I 材である超高純度の Fe-20Cr-5Mo 合金 (8K01) 及び Fe-20Cr-2Mo-3W 合金 (7K07) 並びに比較材として市販材 SUS316L を廃棄物発電プラントに装荷した。その調査結果は下記の通りであった。

(1) 廃棄物発電プラントと供試材取付状況

実環境として対象にしたのは、図 47 に示すごみ焼却発電プラントの露点腐食環境となるガス減温塔下部であり、供試材の取付位置を同図に併せて示す。また、供試材と取付冶具を図 48 に示す。

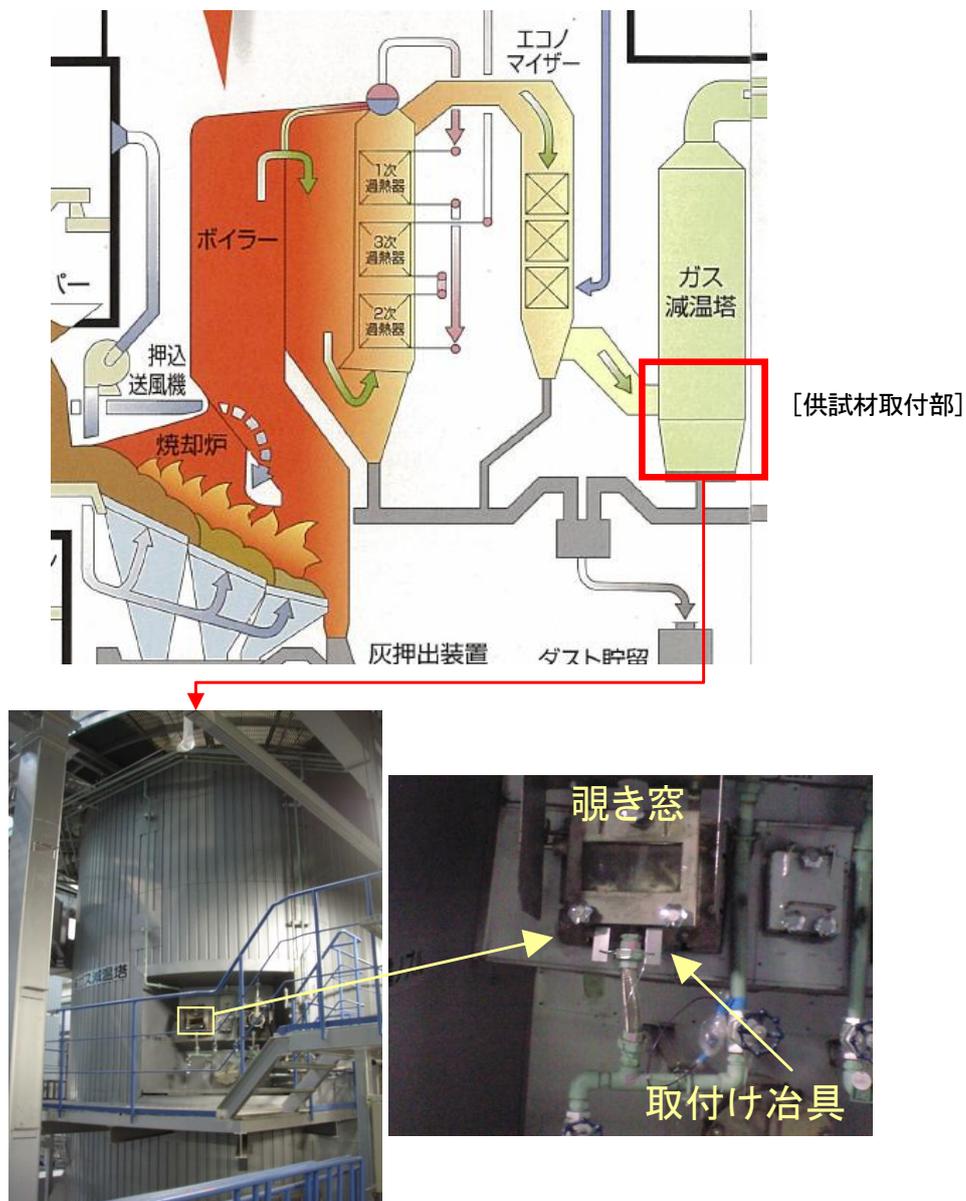


図 47 廃棄物発電プラントへの供試材取付

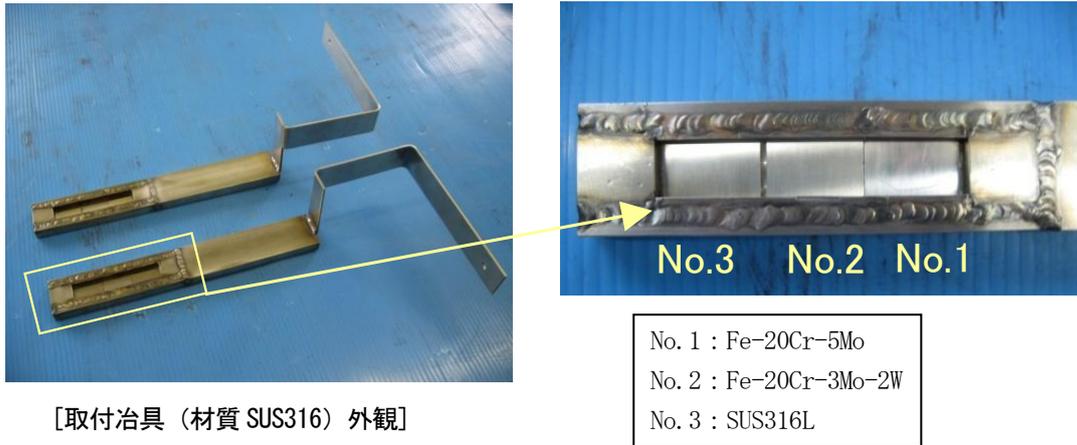


図 48 供試材と供試材取付治具

(2) 実環境試験結果

実環境への曝露期間は3ヶ月(図 47 中、右側の供試材)及び8ヶ月(同、左側の供試材)とし、所定期間経過後、外観撮影、肉厚計測、硬さ計測等を実施した。主な結果は下記の通りであった。

①外観撮影

図 49 に試験治具外観及び供試材設置部の試験治具拡大外観を示す。ガス減温塔内に曝露されていた試験治具部には灰付着や赤褐色の発錆が認められる。



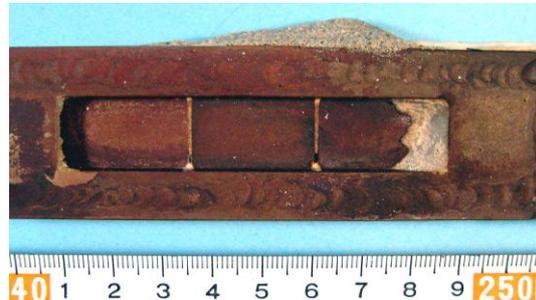
[3ヶ月曝露後の試験治具外観]



[8ヶ月曝露後の試験治具外観]



[3ヶ月曝露後の供試材部外観]



[8ヶ月曝露後の供試材部外観]

図 49 曝露試験後の試験治具及び供試材部外観

図 50 に脱スケール後の各供試材外観を示す。ガス冷却炉内に曝露されていた部位には、各供試材ともに若干肌荒れが認められる。

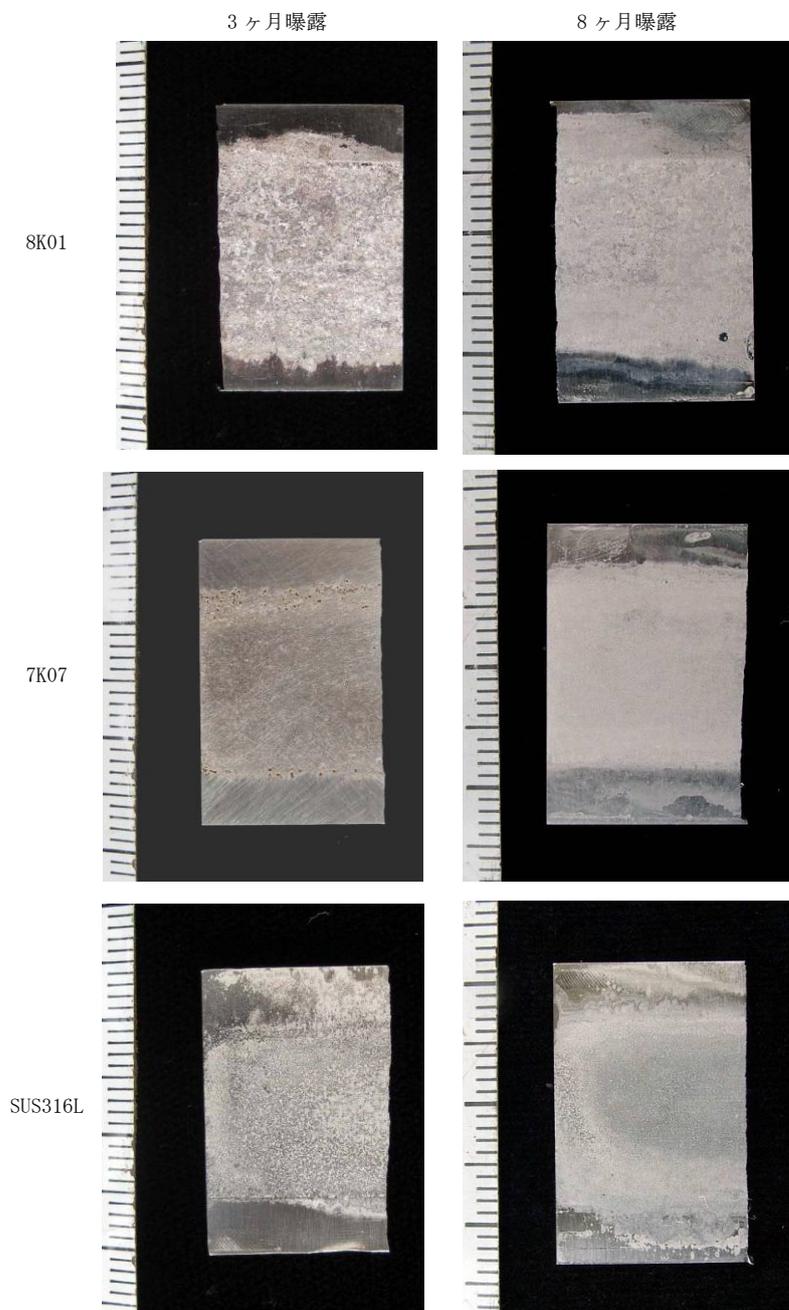


図 50 脱スケール後の供試材外観 (EPMA 分析用に端部を切断)

②肉厚計測

表 12 に試験前後の肉厚測定結果を示す。各供試材の最大減肉量は 0.01mm (10 μ m) 以下であり、曝露期間によらず明瞭な減肉は認められない。また、各供試材の優位差についてもそれぞれ最大減肉量 0.01mm (10 μ m) 以下であり明瞭な優位差は認められない。

表 12 試験前後の肉厚測定結果

符号	曝露時間 (月)	試験 前後	肉 厚 (mm)									最大 減肉量 (mm)	平均 減肉量 (mm)	
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨			測定 位置 平均
8K01	3	前	1.498	1.496	1.495	1.502	1.500	1.496	1.498	1.497	1.491	1.498	—	—
		後	1.498	1.496	1.494	1.496	1.497	1.496	切断のため測定不可			1.496	0.006	0.002
	8	前	1.495	1.496	1.493	1.494	1.496	1.491	1.496	1.495	1.496	1.495	—	—
		後	1.495	1.492	1.492	1.494	1.493	1.490	切断のため測定不可			1.493	0.004	0.002
7K07	3	前	1.493	1.494	1.491	1.493	1.496	1.490	1.496	1.497	1.495	1.494	—	—
		後	切断のため測定不可			1.493	1.496	1.490	1.496	1.495	1.495	1.494	0.002	0.000
	8	前	1.491	1.493	1.494	1.494	1.494	1.496	1.495	1.496	1.493	1.494	—	—
		後	切断のため測定不可			1.492	1.494	1.488	1.491	1.491	1.493	1.492	0.008	0.003
SUS 316L	3	前	1.486	1.482	1.483	1.486	1.487	1.489	1.486	1.486	1.486	1.486	—	—
		後	切断のため測定不可			1.486	1.487	1.484	1.486	1.486	1.486	1.486	0.005	0.000
	8	前	1.499	1.502	1.502	1.500	1.501	1.501	1.499	1.497	1.502	1.500	—	—
		後	切断のため測定不可			1.497	1.498	1.498	1.496	1.496	1.499	1.497	0.003	0.003

③硬さ計測

図 51 に各供試材のビッカース硬さ測定結果を示す。各供試材において、曝露試験後のビッカース硬さの変化は±10HV 以内であり、曝露に伴う硬さの変化は認められない。

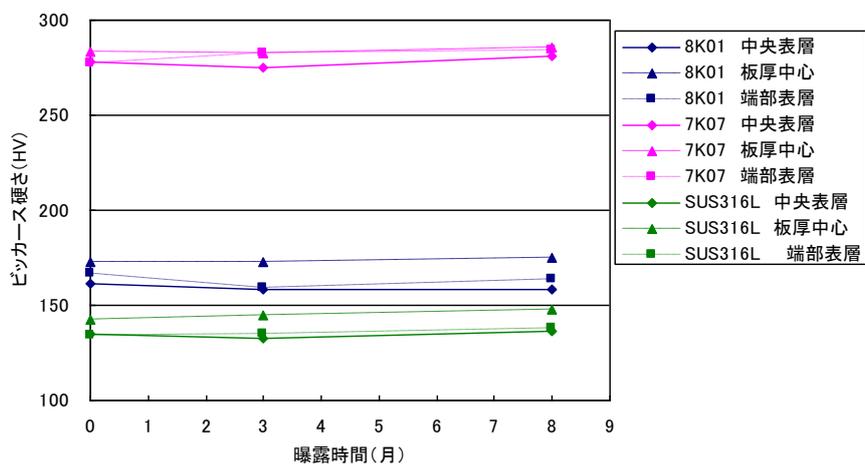


図 51 ビッカース硬さ測定結果 (Hv 10kgf)

(3) まとめ

以上、当該環境の曝露試験では、超高純度 Fe-20Cr-5Mo 合金(8K01)、Fe-20Cr-2Mo-3W 合金(7K07)ともに顕著な腐食は認められず、少なくとも比較材と同等の耐食性を有していることが分かった。

2. 2. 5 システムメリットの試算

超高純度金属材料を実用化し、さらには産業化を図っていく上では、超高純度金属材料を低コスト化することも重要であるが、コストが少々高くてもプラント・システムで超高純度金属材料適用のメリットが明確であることが重要である。そこで、本研究開発では、開発部材を用いた機器単体について、現用材を用いた場合との比較を行い、システム・メリットを確認することとした。

(1) 超高純度金属材料のコスト試算

(1. 1) 中間評価時点での材料想定コスト

先ず、基本となる超高純度金属材料のコスト試算を行った。試算に際しての条件・仮定等は以下の通りである。

①材料種類はSUS310とした。その組成は55wt%Fe-19wt%Ni-24wt%Cr-2wt%Mnである。

②超高純度金属材料の原料粉末コストは表13に示す通りとした。

表13 原材料コスト

材質	純度	コスト (円/kg)
F e	4 Nグレード	5,000
	3 Nグレード	600
	3 Nグレード (量産時)	380
N i	4 Nグレード	20,000
	3 Nグレード	3,070
C r	4 Nグレード	35,000
	3 Nグレード	2,310

③製造設備としては、開発した高真空誘導溶解炉によるインゴット溶製とし、溶解については、年に12回溶解しかつ溶解量も100kg/回とする条件1、及び生産に近く年に50回溶解し、かつ、溶解量も技術的に無理のない最大可能溶解量である300kgとする条件2の2条件とした。なお、設備費は高真空誘導溶解炉の実績をベースに設定した。

④電気代については、長崎試験場の実績から39万円/回と仮定した。

⑤溶解に係る労務費は、3人が担当すると仮定し、一人の労務費を900万円/年と仮定した。

⑥鍛造等の加工費は、現状のSUS310と同等と仮定し250円/kgとした。

⑦設備修繕費は、設備費の2%/年、と仮定した。

⑧一般管理費は10%と仮定した。

⑨原料に3Nグレードの原料を用いた場合でも、高真空誘導溶解炉による溶製によって溶解結果が4Nグレード原料の場合と変わらないと仮定した。(この仮定は、その後の高真空誘導溶解炉による溶解試験結果から、見直しが必要であることがわかった。)

試算結果を表14に示す。

表 14 超高純度金属のコスト試算結果

原料	製造条件	原料費 (円/kg)	設備償却費 (円/kg)	電気代 (円/kg)	労務費 (円/kg)	加工費 (円/kg)	修繕費 (円/kg)	トータルコスト (円/kg)
4N の原料	条件 1	15,000	17,860	1,330	20,000	250	400	60,320
	条件 2		1,430		1,600			22,010
3N の原料	条件 1	1,350	17,860		20,000			45,300
	条件 2		1,430		1,600			7,000

この結果、量産的に年 50 回の溶解を行うことにより現状の溶解炉であっても、超高純度金属材料のコストは 7,000 円/kg となる可能性が示唆されたものの、3N グレード原料で 4N グレード原料と同等の製品を溶製することは困難なため、本研究ではフロントエンドとした 3N グレードから 4N グレードへの不純物除去システム経費分を上乗せする必要がある。従来の高純度材料化コストは表 13 からみても 1 桁上昇することが考えられるが、これは鉄の場合電解に要する経費であり、ここに高真空誘導溶解炉の将来の姿として「真空精錬+水素精錬」等で電解よりも簡易かつ安価で溶製される可能性があることを考えると、1 桁上昇を約 3 割程度に抑えられればトータルで約 10000 円/kg という目標想定コストが達成される。現状のルツボ溶解と電解を考慮すれば、この概念は今後の実証は当然必要ではあるが、不可能ではないと考えられる。さらに、原材料費の低減は量産化が必要であり、その他の費用としては、設備償却費、電気代、労務費等の占める割合が多く、これらの低減化が可能なトン級設備の設計（例えば図 21 など）が必要である。また、トン級の溶解設備とするためには、レンガ積み構造のルツボとする等多くの開発要素が残されている。

(2) 超高純度金属材料を用いたメリットの算出

超高純度金属材料の適用可能な製品を、発電プラントを中心に検討した結果例を図 52 に示す。

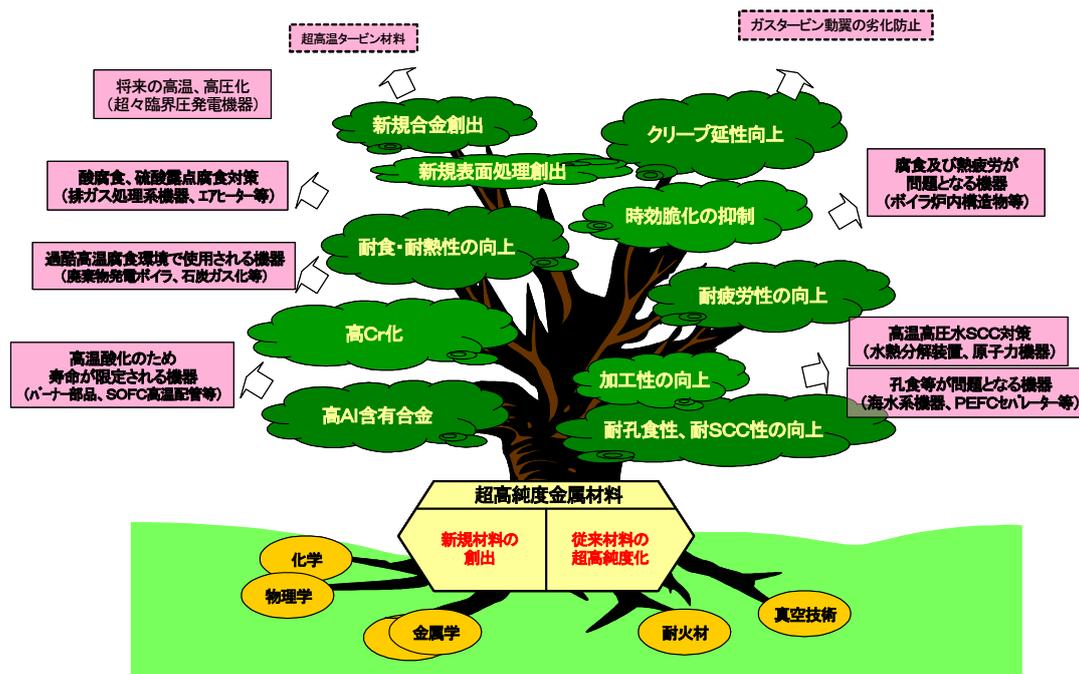


図 52 超高純度金属の適用可能な発電プラント部品とその効果

火力発電プラントでの超高純度金属材料の適用効果例を図 53 に示す。

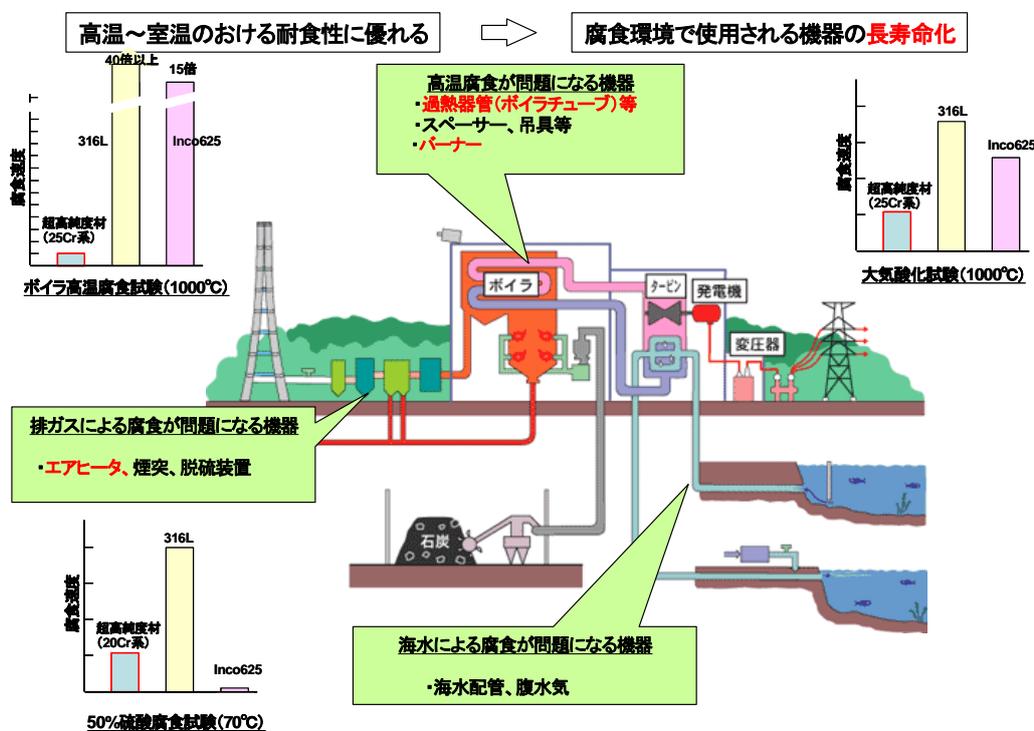


図 53 火力発電プラントへの超高純度金属材料の適用効果例

火力発電プラントにおいて、耐環境性に優れる超高純度金属の適用効果が顕著に期待できる部材として、①ボイラ過熱器管 ②ボイラバーナ部品 ③エアヒータエレメントの3部材を対象に、超高純度金属材料を適用した際のメリット試算を行った。

(2. 1) ボイラ過熱管

効果を判りやすくするために、高効率の廃棄物発電プラントを対象にメリット試算を行った。最も使用条件の厳しい三次の過熱器管 (SH) への適用を考えた。現状の材料コストは 6000~8000 円/kg であり、表 14 に示す超高純度金属材料と同等のコストである。耐食性については少なくとも 2 倍以上の耐食性を有すると仮定した。

この結果、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、1,875 百万円低減が可能であるとの試算結果となった。(図 54)

高効率廃棄物発電ボイラ過熱器(SH)の構成			Alloy625と超高純度金属材料の比較		
一次SH(～370℃)	従来 STBA22	超高純度金属材料採用の場合 STBA22	Alloy625		超高純度金属材料
二次SH(～450℃)	SUS310系	SUS310系	耐食性 (廃棄物燃焼環境)	1mm/年	0.5mm/年未満(検証)
三次SH(～500℃)	Alloy625	超高純度金属材料	材料コスト(円/kg)	6000～8000円/kg	Alloy625と同様

貢献内容		効果の試算																						
蒸気温度 上昇	発電効率向上	[効果] ・ゴミ処理規模1200t/日、蒸気温度400℃→500℃ 発電端効率:20%→26% (但し、発電原単価は400℃～450℃がミニマム)																						
	発電効率向上 による CO2削減効果	[条件] ・ゴミ処理規模1200t/日のプラントで効率20%→26%(400℃→500℃) ・年間稼働率:70% ・ゴミの発熱量(α):2000kcal/kg ・CO ₂ 削減量の原単位(β):320g-CO ₂ /kWh [効果] (ゴミ発電の出力増=石油火力の減負荷として試算) ・CO ₂ 削減量:1.37×10 ⁴ (ton/年) $[1200 \times 10^3 \times \alpha \times 4.186 / (24 \times 3600) \times (0.26 - 0.20) \times 365 \times 24 \times 0.7 \times \beta / 10^6]$																						
耐久性向上による メンテナンス費用削減*		[条件] ・ゴミ処理規模1,200t/日の高効率発電プラント:蒸気温度500℃ ・超高純度金属材料採用により三次SHの寿命が2倍(交換期間4年→8年) [効果] 修繕費削減に伴う経費削減効果:75百万円/年																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>従来材(Alloy625)</th> <th>超高純度金属材料</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>発電設備建設費(百万円)</td> <td>10,000</td> <td>←</td> </tr> <tr> <td>SH建設費(百万円)</td> <td>3,000</td> <td>←</td> </tr> <tr> <td>SH部年間経費(百万円/年)</td> <td>230</td> <td>155</td> </tr> <tr> <td>(内 修繕費)</td> <td>(150) *2</td> <td>(75) (▲75)</td> </tr> <tr> <td>ライフサイクルコスト(百万円)</td> <td>8,750</td> <td>6,875</td> </tr> <tr> <td>(25年)</td> <td></td> <td>(▲1,875) ¥</td> </tr> </tbody> </table>			従来材(Alloy625)	超高純度金属材料	発電設備建設費(百万円)	10,000	←	SH建設費(百万円)	3,000	←	SH部年間経費(百万円/年)	230	155	(内 修繕費)	(150) *2	(75) (▲75)	ライフサイクルコスト(百万円)	8,750	6,875	(25年)		(▲1,875) ¥
	従来材(Alloy625)	超高純度金属材料																						
発電設備建設費(百万円)	10,000	←																						
SH建設費(百万円)	3,000	←																						
SH部年間経費(百万円/年)	230	155																						
(内 修繕費)	(150) *2	(75) (▲75)																						
ライフサイクルコスト(百万円)	8,750	6,875																						
(25年)		(▲1,875) ¥																						



*平成3年～11年に実施されたNEDO委託事業「高効率廃棄物発電技術」の試算例を参照したものである

図54 廃棄物発電プラントへ超高純度金属を実用した際の経済性評価結果

(2.2) ボイラバーナ部品

ボイラ部材の中でも火炎に晒されるバーナ部品は、高温酸化、脆化が起こり頻繁な交換が強いられている。この部材への超高純度金属材料の適用効果を試算した。ここでも、2倍以上の耐食

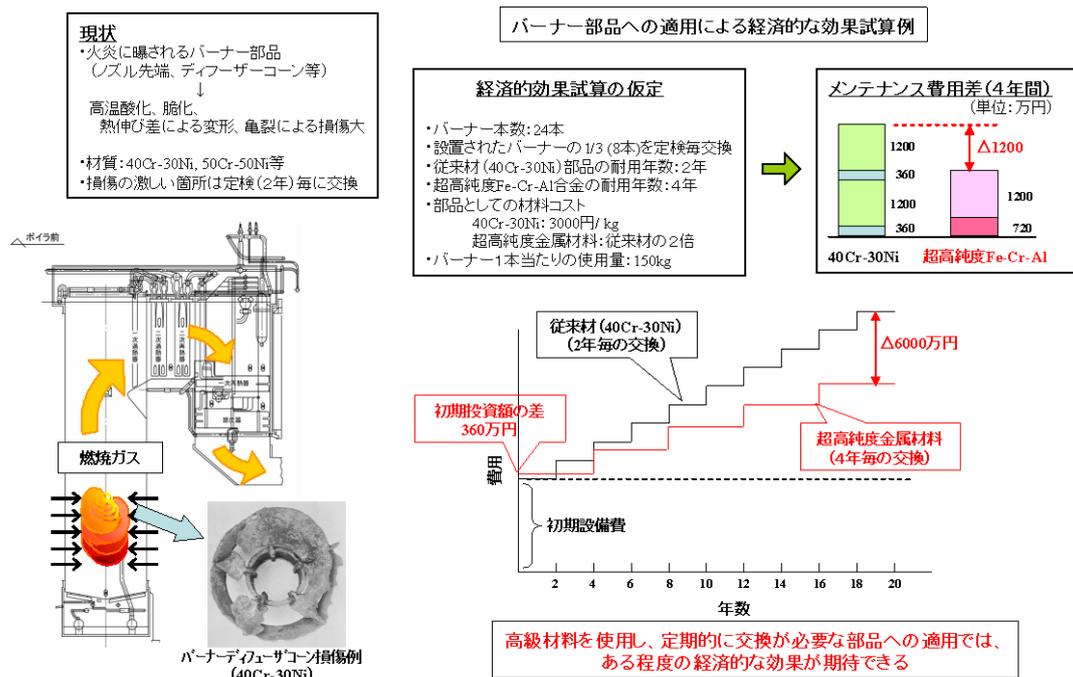


図55 ボイラバーナ部品へ超高純度金属を実用した際の経済性評価結果

性を有すると仮定した。この結果、20年間のメンテナンスコストは60百万円削減可能であるとの試算結果となった。(図55)

(2.3) エアヒータエレメント

腐食が激しく頻繁に部品の交換を行っているエアヒータエレメントを対象にコスト試算を行った。

エアヒータエレメントでは、現状安価な炭素鋼を用いており、耐食性に優れた超高純度金属材料を適用しても、コスト差が大きく経済メリットが小さいことが明らかとなった。(図56)

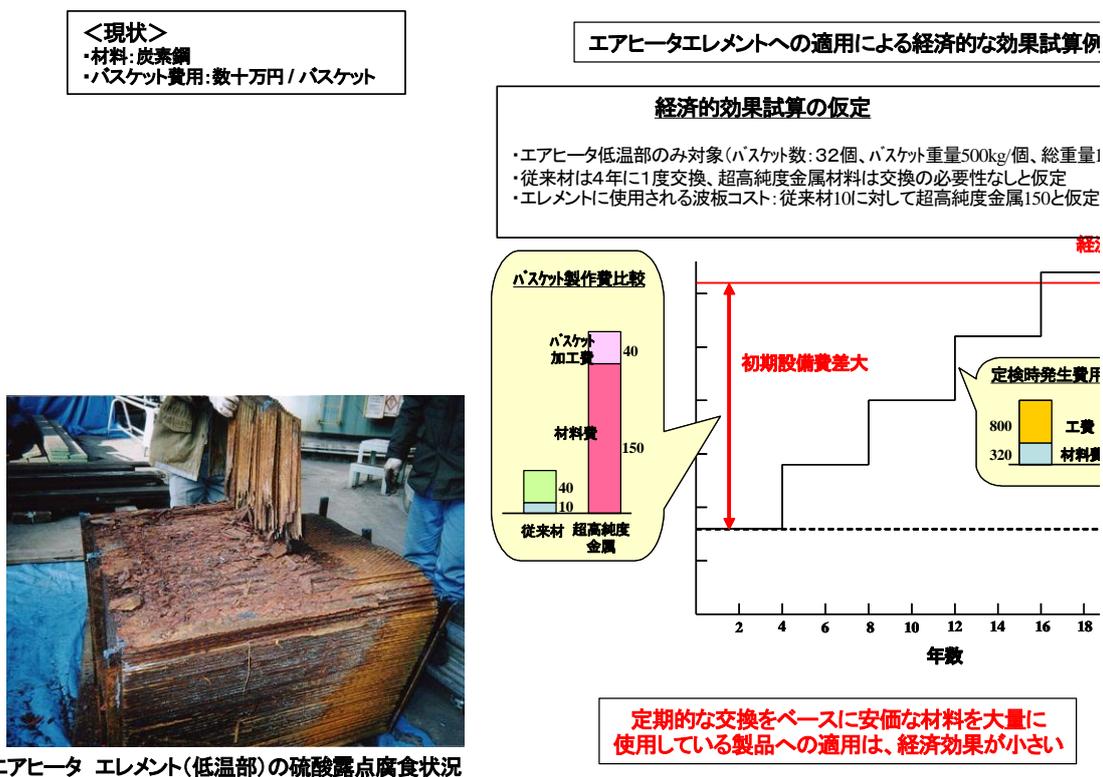


図56 ボイラエアヒータエレメントへ超高純度金属を実用した際の経済性評価結果

(2.4) まとめ

以上の結果より、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ことが明らかとなった。

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

(1) プロジェクト成果のまとめ

本プロジェクトの開発成果をまとめると、以下の通りとなる。

①超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発

- ・耐久性に優れ、金属材料の高純度化溶製に対し汚染の少ない新規 URC ルツボを開発し、本ルツボの大型化を目論むレンガ構造についても実用化見通しを得た。
- ・既存技術での不純物除去プロセスをフロントエンドとして、本プロジェクトにより開発・実用化した 100kg 級高真空誘導溶解炉を用いて原料溶解を行い、C, Si, Mn, P, S, N, O の主要不純物総量が 50ppm レベル以下の超高純度金属材料製造を実証した。
- ・認証用標準物質を作製し、超高純度鉄の国内外での標準化に寄与した。

②開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価

- ・超高純度金属材料として3種のカテゴリー（耐環境部材、耐環境・強度部材、高温高強度部材）の Fe-Cr 系を中心とした合金材料を開発し、高純度化により粒界の清浄化が図れ、延性・衝撃値が飛躍的に向上すること、時効析出が抑制されることを明らかにした。
- ・超高純度合金では加工性、耐食性が向上する。加工性が向上することで、従来は加工が不可能とされていた「合金の高 Cr 化」及び「Al 等の元素の添加が可能」となる。これらにより、一層の耐環境性の向上、強度特性の向上が期待できる。
- ・現状では、添加元素によって特化された合金によっては加工性、溶接性に課題が生じる場合があることがわかり、期待する特性に対応する材料開発にはさらなるサーベイが必要である。一方、既存合金の高純度化により溶接性が飛躍的に向上するケースもあり、図 57 に示すように発電プラント用超高純度金属材料の適用性についての知見が得られたといえる。



図 57 超高純度金属材料の発電プラントへの適用の考え方

(2) 実用化見通し

本プロジェクトにおいて、前項に示したように「作る技術」と「使う技術」のそれぞれに開発成果が得られた。これらの成果を踏まえ、今後の実用化について以下に示す。

(2. 1) 「作る技術」の実用化

個々の要素技術について実用化の見通しが得られている。

- ①新規 URC ルツボは実際に溶解試験において相当回数用いられ、既に実用化のレベルにあるといえる。
- ②精錬技術としては既存の技術を超高純度金属材料溶製に適用できることが分かったが、真空精錬と水素精錬の組合せ等の耐火物ルツボ溶解における新規精錬は未実証ながら実用性を示唆させた。
- ③本プロジェクトでは 100kg 級高真空誘導溶解炉を新規に設計・製作し、実際の溶解にてその有意性を検証した。従い、URC ルツボ同様 100kg 級では実用化レベルにあるといえる。
- ④超高純度金属材料溶製における迅速分析技術は実用レベルに達したといえる。
- ⑤CC 炉では認証用に供する標準物質を作製済みである。

(2. 2) 「使う技術」の実用化

ここでは超高純度金属開発材とその加工技術に大別して実用化が検討された。

- ①加工技術については各種の加工技術が適用できることが実証され、部材・部品製造の実用に供することができるレベルにある。
- ②開発材の実用化に関し、超高純度金属材料を用いたシステムのメリット試算に示した通り、例えば、廃棄物発電ボイラの過熱器管では、発電効率向上、メンテナンス費用削減のメリットが期待できる可能性を明らかにした。また、上述したように、現状では必ずしもすべての材料特性に秀でた超高純度金属材料というものは開発されているわけではないものの、材料特性上からは、耐食性などの特定の機能に関して現用材に比して数倍以上の飛躍的な性質向上が見込めることが明らかになっている。したがって、現在までの超高純度金属材料の開発の結果、その優れた特性を発揮できる部分についての実用化見通しは得られたといえる。また、材料によっては摘出された課題を克服する研究開発を続けることで実用化への見通しが得られることも期待できる。例えば、カテゴリーⅢの Fe-Cr-Ni 系合金などにおいては、添加元素や組成を見直しての溶接性の改善などにより発電プラント用構造部材としての実用化が見通せてくると期待できる。

(3) 事業化について

(3. 1) 「作る技術」に関する事業化

各開発要素に対して事業化を見通すと以下の通りである。

- ①新規開発 URC ルツボの事業主体は耐火物メーカーである。いくつかのメーカーに接触した結果で

は、マーケット指向性が強いので、今後の超高純度金属材料の溶製の発展に期待するところが大きい。なお、波及的に Ti 合金等の溶解用には適合性が高く、マーケットの拡がりに合せた事業展開が見込めると期待される。

- ②超高純度金属材料溶製システムについては、事業化を想定した連続鋳造システム概念を策定しており、開発材のニーズによるところが大きい。
- ③少量だが、標準物質のサンプル事業は実現性が高い。

(3. 2) 「使う技術」に関する事業化

本研究開発の受託先である超高純度金属材料技術研究組合の参加企業には、ユーザとなる電力各社（東北電力、東京電力、中部電力、関西電力、九州電力等）とメーカである重電各社（日立製作所、東芝、三菱重工業）並びに素材メーカ（日本製鋼所）等が参加しており、超高純度金属材料を開発することによる事業化の可能性は高いと考えられる。

具体的にも、平成23年度には、上記参加企業の一部で超高純度金属材料の優れた特性を実地のプラント課題に則して明確化すべく企業研究を継続する予定である。

また、波及効果としては、本研究開発の発電プラント以外への適用として、超高純度金属材料は粒界脆化特性にすぐれており、将来の水素社会に向けた水素関連機器への適用が期待できる他、超高純度化により高強度化が達成できれば船舶等の運輸部門への適用も期待できる。

図 58 は、超高純度金属材料開発材の事業化に向けた展開例である。図中の「A」は本プロジェクトの実用化に向けた展開、「B」は波及的な実用化展開である。なお、図には示されていないが、実用化、事業化には材料を見極めた上での量産化研究も併せて実施されることとなる。



図 58 事業化・実用化に向けた展開

2. 成果状況一覧

(1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
19年3月27日	日本金属学会春季大会	高純度25Cr-3Al-Fe合金製耐熱ベローズの試作とその特性評価	鉄井利光 安彦兼次他
19年7月	14 th International Conference on Ultra-High Purity Base Metals and Model Alloys	超高純度金属材料の衝撃値と熱処理条件の関係	川原田義幸 鉄井利光 安彦兼次
20年11月7日	第1回超高純度金属材料技術研究組合シンポジウム	プロジェクト成果報告（シリーズ報告）	安彦兼次他
21年12月14日	超高純度金属国際会議（UHPM-2009）	Fundamental Research on “Nano-Metallurgy” to discover amazing metals of incredible properties	安彦兼次
21年12月15日	超高純度金属国際会議（UHPM-2009）	Recent Development in High-Purification of Iron (II)	高木清一他
21年12月15日	超高純度金属国際会議（UHPM-2009）	Development Study of High-Purity Stainless Alloys	菱沼章道他
21年12月18日	超高純度金属材料国際講演会	「発電プラント用超高純度金属材料の開発」プロジェクトの現状	菅原 彰

(2) 学会誌等における論文発表

- ① 「日経ものづくり 特集《常識を超えろ》」（日経BP社発行）、平成18年3月号
- ② 「工業材料」（日刊工業新聞社発行）平成20年1月号（Vol.56 No.1）

(3) 特許等

（出願済特許等リスト）

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
19年3月28日	P2007-085492	金属溶解用ルツボ及びその表面処理方法	三菱重工業(株) 安彦兼次
20年3月28日	P2008-088799	金属溶解用ルツボ及びその製造方法	三菱重工業(株) 安彦兼次
20年3月28日	P2008-088809	金属溶解用ルツボ及びその表面処理方法	三菱重工業(株) 安彦兼次
20年10月23日	P2008-272974	耐疲労特性に優れる高純度鉄合金	安彦兼次
20年10月23日	P2008-272990	固相接合性に優れる高純度鉄合金	安彦兼次
20年11月6日	P2008-284939	高温高強度特性に優れるオーステナイト系高純度合金	安彦兼次
20年11月6日	P2008-284947	オーステナイト系高純度合金	安彦兼次

22年2月23日	特願2010-036886	金属溶解用ルツボ	三菱重工業(株) 安彦兼次
22年2月23日	特願2010-036887	金属溶解用ルツボの製造方法	三菱重工業(株) 安彦兼次

3. その他特記事項

(1) 成果普及の努力（プレス発表等）

①ルツボ産業化に向けた成果普及

新規開発ルツボにつき、耐火材メーカーに対し公開ベースにて開発技術紹介を行い、技術伝承と普及に努めている。

②プレス発表

- ・平成 17 年 9 月 30 日付《日刊工業新聞》「鉄鋼業界にナノテクの波 “スーパー金属” 見えてきた」
- ・平成 18 年 1 月 16 日付《日経産業新聞》「さびない鉄 常識覆す」
- ・平成 19 年 5 月 25 日付《日本経済新聞》「超高真空炉が完成 試験に成功」
- ・平成 21 年 8 月 10 日付《日刊工業新聞》「次世代産業の芽 鉄に存在感」
- ・平成 21 年 8 月 24 日付《日本経済新聞》「ステンレス高純度合金 耐久性 1 万時間」
- ・平成 21 年 9 月 4 日付《毎日新聞》「鉄 生命 星の誕生と死 地球環境の激変」
- ・平成 21 年 9 月 22 日付《朝日新聞》「重い存在 “鉄” 新時代へ」
- ・平成 22 年 1 月 18 日付《日経産業新聞》「さびない鉄で砂漠に原発 純度 99.9998%超の “暮らし革命”」
- ・平成 23 年 1 月 17 日付《日本経済新聞》「東北大の純鉄 標準物質に」
- ・平成 23 年 2 月 25 日付《日本経済新聞》「日本発の “超高純度鉄” 世界標準へ」

③TV放映

- ・平成 21 年 8 月 8 日 06:00～放映 NHK 「おはよう日本」（展示会『鉄-137 億年の宇宙誌』）
- ・平成 21 年 10 月 31 日 22:00～放映 NHK 「サイエンス ZERO」

④展示会

- ・平成 21 年 7 月 24 日～10 月 31 日「鉄-137 億年の宇宙誌」（東京大学総合研究博物館）

(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」基本計画

エネルギー対策推進部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

金属材料は近年、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、安心・安全な社会構築等を実現するため、さらに高度な特性を発現させることが必要である。

具体的には、発電プラント等では、高温腐食や磨耗、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るほか、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（CO₂削減）や、部材交換頻度の減少等に伴う発電コスト軽減等が期待されている。

発電効率の向上等の技術開発については、「エネルギー基本計画」（平成15年10月閣議決定）に、安定供給の確保、環境問題への対応、エネルギー・コスト低減等の観点から重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及び施策の一つ「電力に関する技術における重点的施策」に上げられている。

これまでの元素添加と熱処理による現行の金属材料開発手法等では、金属材料の新たな特性を引き出し、飛躍的に向上させることは限界に近づいている。一方、金属の超高純度化等による特性飛躍を目指す「ナノメタル技術プロジェクト」（平成13年度～18年度）において、「超高純度金属材料[Fe-Cr系合金等]」の開発を推進した結果、従来の材料より遙かに優れた特性が得られることを確認しており、超高純度金属材料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と考えられる。なお、超高純度金属材料は、Ni含有量を低減しつつ特性を維持することができ、レアメタルの枯渇に対応するための代替技術としての成果も見込まれている。

超高純度金属材料は新しい材料であり、産業化のためには技術的な検討課題が多く存在するため、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。このため、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独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が関与する研究開発事業として進めていく必要がある。

本事業は、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、また、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およ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。

(2) 研究開発の目標 最終目標

超高純度金属材料は、耐環境性、靱性、加工性等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。産業化に当たっては、発電プラント等での利用を想定すると、優れた特性を維持した材料の低コスト・量産化の技術開発が必須である。

本事業では、以下を研究開発目標とする。

- 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）
- ② 低コスト原料から C、Si、Mn、P、S、N、O の不純物総量が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及び精錬技術を開発する。

③ 不純物濃度と各種特性の関係を明らかにする。

④ 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用途をたてるもの）
火力発電プラントの煙突ライナー・煙道に適用できる見通しを得る。

(b) 中期的開発部材（2015年頃に実用化が期待できるもの）
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。

(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、新たな開発部材として、700℃級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。

⑤ 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。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[委託事業]

① 超高純度金属材料の低コスト・量産化製造技術の開発

② 開発材料による部品製造技術の開発及び実用性評価

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の原則本邦の企業、研究組合、公益法人、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施者を選定の上、委託して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDOが委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）及びサブプロジェクトリーダーを置き、その下に効果的な研究開発を実施する。

研究開発責任者（プロジェクトリーダー）

超高純度金属材料技術研究組合 技術部長 廣田 耕一氏

サブプロジェクトリーダー

九州電力株式会社 火力発電本部 発電技術開発部 再生可能エネルギー
グループ長 村田 憲司氏

九州電力株式会社 技術本部 総合研究所 機械・金属グループ長
主席研究員 金谷 章宏氏

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。このため、必要に応じて、NEDOに設置する委員会及び技術検討会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成17年度から平成22年度までの6年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成19年度に、事後評価を平成23年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

得られた研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) プロジェクトの根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法 第15条第1項第2号に基づき実施する。

(4) その他

本プロジェクトは、関連プロジェクトである「ナノメタル技術」の成果と評価結果を適切に反映するものとする。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成17年3月、制定。

(2) 平成18年2月、プロジェクトリーダーの設置に伴い研究開発の実施体制を、研究開発の具体的内容の追加により研究開発計画とスケジュールを変更して改訂。

(3) 平成18年3月、プロジェクトの名称を変更して改訂。

(4) 平成19年5月、プロジェクトリーダーの変更に伴い研究開発実施体制を変更して改訂。

(5) 平成19年8月、評価に関する事項及び、その他重要事項を変更して改訂。

(6) 平成20年3月、中間評価結果を受けて研究開発の目標、目標値、実施内容等を変更して改訂。

(7) 平成20年6月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

- (8) 平成21年2月、プロジェクトリーダーの変更に伴う実施体制の変更及び目的、目標の表現をより具体化して改訂。
- (9) 平成22年3月、プロジェクトを1年延長に伴い、目標を追記して改訂。プロジェクトリーダー及びサブプロジェクトリーダーの変更を反映。
- (10) 平成22年11月、平成21年までの実施内容のフォローアップとして溶解試験を追加するとともに、認証用標準物質の作製を追加したことを反映して改訂。

7. 研究開発スケジュール

項 目	17FY	18FY	19FY	20FY	21FY	22FY
①低コスト・量産化製造技術開発						
(1)-1 高耐久ルツボ・耐火材の開発	—————					
(1)-2 新規精錬技術開発	—————					
(1)-3 高真空誘導溶解炉の開発	—————					
(1)-4 認証用標準物質の作製						—————
②部品製造技術開発及び実用性評価		—————				
(2)-1 超高純度金属材料の開発	—————					
(2)-2 部材製造技術開発				—————		
(2)-3 実プラントによる実用性評価試験	—————					
(2)-4 システムメリットの試算						

↑
中間評価

↑
事後評価

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目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. 研究開発の必要性

京都議定書の発効に伴いCO₂の削減がさらに重要な課題となっている今日、産業部門でCO₂排出量の多い火力発電での高効率化が期待されている。耐環境性、靱性等に優れた発電プラント用超高純度金属材料 (Fe-Cr 系合金等) の低コスト・量産化技術を開発することができれば、発電効率の向上及び大幅なCO₂排出量の削減が見込まれる。

超高純度金属材料 (Fe-Cr 系合金等) を製造するためには、現状、高価な高純度素材を原料に用いた高真空溶解を行っており、工業規模での低コスト、量産化を図るため、低コスト原料を用いた新規精錬技術等の研究開発が不可欠である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 高耐久ルツボ・耐火材の開発

不純物の溶出が少なく、かつ耐久性に優れた新規な高純度ルツボ・耐火材の開発として、CaO ルツボの表面改質技術、CaO 原料粉末粒度の最適化、MgO、ZrO₂ 等酸化物の添加等の研究開発を実施する。さらに、溶解炉大型化に向けた耐火材の開発を行う。

(2) 新規精錬技術開発

低コスト原料から超高純度金属材料を溶製するため、水素、アルミニウム等を用いた精錬技術を利用して高純度溶解技術を開発する。

(3) 高真空誘導溶解炉の開発

溶解量100kg級の高真空誘導溶解炉 (VIM 炉) を設計・設置する。この高真空誘導溶解炉を用いて、従来の超高純度金属材料の製造法に比較して、低コスト化と不純物総量の低減が可能な溶製技術であることを実証する。

(4) 認証用標準物質の作製

超高純度鉄の作製を行い、認証用標準物質として登録する。

3. 達成目標

[中間目標] (平成19年度の間評価時点)

- ① 低コスト原料から精錬等により、超高純度金属材料が得られる目途を付ける。
- ② 試作素材について、優れた材料特性が維持されていることを確認する。

[最終目標]

- 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)
- ② 低コスト原料から C、Si、Mn、P、S、N、O の不純物総量が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及び精錬技術を開発する。

研究開発項目②「開発材による部品製造技術の開発及び実用特性評価」

1. 研究開発の必要性

現在、火力発電プラントでは、大型鍛造品には低合金鋼等が、蒸気配管には 9Cr~12Cr 鋼等が、伝熱管にはステンレス鋼等が主に利用されている。このような従来材については、発電効率を高めるために、より高温での強度・耐環境等を求め研究開発が行われているが、金属材料の新たな特性を引き出し、また、飛躍的に向上させることは既存技術（元素添加と熱処理による手法等）では限界に近づいている。

したがって、研究開発項目①で得られる超高純度金属材料の特性評価試験を実施し、従来金属材料を遙かに凌駕する特性を有する材料を開発する必要がある。さらに、得られた超高純度金属素材について、その優れた材料特性を損なわずに発電プラント等で利用するために、材料に適した各種の接合、加工技術の研究開発を行うことも必要である。

また、加工した部材について、産業への適用性を実証するために、火力発電プラント等の実環境下での特性評価試験等を行う必要がある。

なお、開発材を実際に産業化するためには、システムメリットが現用材を上回る必要がある。本事業で開発する素材について、実際に想定される部材について、開発部品の性能とそのコスト試算、適用を考えているシステムでのトータルシステムメリットを試算する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 超高純度金属材料の開発

超高純度 Fe-Cr 系合金又は超高純度 Fe-Cr-Ni 系合金（主として耐環境性が要求される部材が対象）及び超高純度 Fe-Cr-Ni 系合金（主として強度が要求される部材が対象）について、研究開発項目①で開発した高真空溶解炉を用いて、超高純度金属材料の溶解試験及びその特性評価試験を実施し、適用候補部材毎に設定した開発目標を達成していることを確認する。また、汎用溶解炉を用いた溶解試験等で不純物濃度をパラメータとした試験を実施し、産業化レベルでの不純物濃度と各種特性の関係を明らかにし、有害元素の見極めと低減方策を明確化する。さらに適用対象部材に合わせた低減すべき不純物濃度を規定する。

プロジェクト参加各社へのサンプル提供による評価を実施するとともに、公的研究機関へのサンプル提供も検討する。

(2) 部材製造技術開発

上記（1）で開発する超高純度金属材料を用いて、煙突ライナー・煙道、廃棄物発電プラント用過熱器管等を実用化するに際して必須な接合、塑性加工、機械加工等の部材製造技術を開発する。

(3) 実プラントによる実用性評価試験

発電プラント用部材としての適合性評価のため、火力発電プラント等の実プラントで実用性を評価する試験を実施する。

また、実用化に耐え得る性能向上及び実用化への見通しを付けるのに必要なデータの収集を行う。

(4) システムメリットの試算

開発部材を用いた機器単体についての LCA 評価を行い、現有材を用いた場合との比較を行う。システムメリットの計算により、プロジェクト終了時に民間企業からの投資が得られるような商業ベースが成り立つようプロジェクトの目標の見直し等を適宜行う。

3. 達成目標

[中間目標] (平成 19 年度の中間評価時点)

開発素材の優れた特性を低下させない部品製造技術の目途を付ける。

性能／コスト比が最終目標を満たすと見込まれる製造技術の目途を付ける。

[最終目標]

①不純物濃度と各種特性の関係を明らかにする。

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見通しを得るもの）

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

○目標：・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

○目標：・現用材である SUS310 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
- ・350～400℃の温度域でのクリープ破断強度 100MPa 以上
- ・現用材である SUS310 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）

(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℃級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。

○候補材料系：Fe-Cr-Ni 系超高純度合金

○目標：

- ・実用化段階の目標である 700℃、 10^5 時間におけるクリープ破断強度が 70MPa 以上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℃、 10^5 時間のクリープ破断強度が 70MPa 以上であること。
- ・現用材である火 SUS304 J1HTB と同程度の加工性と溶接性があること。
- ・既存加工プロセスで製作が可能なこと。

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。

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

(「発電プラント用高純度金属材料の開発」関係部分抜粋)

平成22年4月1日
産業技術環境局
資源エネルギー庁

1. 目的

「新成長戦略(基本方針)」(2009年12月閣議決定)に記載されている我が国の強みを活かした「課題解決型国家」の実現に向け、世界をリードする「グリーンイノベーション」などを迅速に推進し、課題解決とともに新たな成長の実現を目指す。

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には、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が不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。

エネルギー安全保障の確立や、世界全体の温室効果ガスを2050年までに半減するという長期目標を達成するため、以下に政策の柱毎に目的を示す。

1-I. 総合エネルギー効率の向上

1970年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030年までにGDPあたりのエネルギー利用効率を約30%向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1-II. 運輸部門の燃料多様化

ほぼ100%を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標(2030年に向け、運輸部門の石油依存度が80%程度となることを目指す)の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1-IV. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にCO₂を排出しないクリーンなエネルギー

源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

- 「新成長戦略（基本方針）」（2009年12月閣議決定）
 - 「（1）グリーンイノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」及び「（5）科学・技術戦略立国戦略」に対応。
- 低炭素社会づくり行動計画（2008年7月閣議決定）

2008年6月の福田総理（当時）のスピーチ「福田ビジョン」等を受け、我が国が低炭素社会へ移行していくための具体的な道筋を示すため、国全体を低炭素化へ動かす仕組みや革新的な技術開発、国民一人ひとりの行動を促すための取組について策定。

「環境エネルギー技術革新計画」や「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」等に表示された革新的技術の開発に5年間で300億ドル程度を投入するという具体的な目標が示された。
- 環境エネルギー技術革新計画（2008年5月）

温室効果ガスの大幅な削減を目指すだけでなく、エネルギー安全保障、環境と経済の両立、開発途上国への貢献等を考慮し、以下の戦略等を策定。

 1. 低炭素社会実現に向けた我が国の技術戦略
 2. 国際的な温室効果ガス削減策への貢献策
 3. 革新的環境エネルギー技術開発の推進方策
- Cool Earth—エネルギー革新技術計画（2008年3月）

2007年5月の総理イニシアティブ「クールアース50」を受け、世界全体の温室効果ガスの排出量を現状に比して2050年までに半減するという長期目標を達成するため、エネルギー分野における革新的な技術開発について検討をおこない、21の技術を選定。
- エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

 1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
 2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
 3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
 4. 新エネルギーに関する技術
 5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。
- 新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 運輸エネルギーの次世代化計画
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

○ 第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置づけられている。

○ 京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

3. 達成目標

3-I. 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス効率向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、GDP当たりのエネルギー消費指数を2030年度までに少なくとも30%改善することを目指す。

3-II. 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ100%の運輸部門の石油依存度を2030年までに80%程度とすることを目指す。

3-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

3-IV. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

2030年以降においても、発電電力量に占める比率を30~40%程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

3-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4. 研究開発内容

4-I. 総合エネルギー効率の向上

4-I-i. 共通

(14) 発電プラント用超高純度金属材料開発(運営費交付金)(4-IV-iv参照)

4-IV-iv. 電力供給安定化技術等・その他

(5) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)

①概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2010年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

③研究開発期間

2005年度～2010年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備(成果の実用化、導入普及に向けた取組)

5-I. 総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークの導入と初期需要創出(高効率機器の導入補助等)
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5-II. 運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

- 補助金等による導入支援
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5-IV. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用プログラム基本計画（平成16・02・03産局第6号）は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第8号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第10号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第12号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第11号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成16・06・04産局第13号）は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第14号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第9号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第17号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第12号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成17・03・25産局第13号）は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画（平成17・03・29産局第2号）は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成17・03・31産局第19号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第15号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第18号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第17号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成18・03・31産局第16号）は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成19・03・26産局第1号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成19・03・20産局第4号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成19・03・19産局第7号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成19・03・16産局第3号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成19・03・23産局第2号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (6) 平成21年4月1日付け制定。エネルギーイノベーションプログラム基本計画（平成20・03・25産局第5号）は廃止。
- (7) 平成22年4月1日付け制定。エネルギーイノベーションプログラム基本計画（平成21・03・26産局第1号）は廃止。

ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

（「発電プラント用高純度金属材料の開発」関係部分抜粋）

平成22年4月1日

産業技術環境局

製造産業局

1. 目的

「新成長戦略（基本方針）」（2009年12月閣議決定）に記載されている我が国の強みを活かした「課題解決型国家」の実現に向け、世界をリードする「グリーン・イノベーション」、「ライフ・イノベーション」などを迅速に推進し、課題解決とともに新たな成長の実現を目指す。

具体的には、ナノテク・部材イノベーションプログラムにおいては、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技術革新（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する。

2. 政策的位置付け

○新成長戦略（基本方針）（2009年12月閣議決定）

- ・ 「（2）グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」「（3）ライフ・イノベーションによる健康大国戦略」「（5）科学・技術立国戦略」に対応

○第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

- ・ 「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つに指定、優先的に資源配分することとされている。
- ・ 我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

○「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

- ・ 「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1. 生涯健康な社会形成」、「2. 安全・安心な社会形成」、「4. 世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5. 世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・ 所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
 - ・ 学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
 - ・ 社会受容を促すための積極的な取り組み
 - ・ 知的財産確保のための戦略的な取り組み

3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を実現する。
- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を技術先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、省エネルギー化を目指した低炭素社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

IV. エネルギー・資源・環境領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して、エネルギー・資源・環境等の社会的制約を克服すると同時に我が国の強みであるナノテク関連産業・部材産業の競争力を強化する。

(i) エネルギー制約の克服

(8) 発電プラント用超高純度金属材料の開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2010年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上での低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

③研究開発期間

2005年度～2010年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備（関連施策）

ナノテクノロジーは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

[技術戦略マップ]

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテクノロジー・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進している。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携（川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など）による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進している。

〔サンプル提供・実用化促進〕

- ・NEDOでは、実施する研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施している（サンプルマッチング事業）。

〔基準・標準化〕

- ・経済産業省では、ナノテクノロジー関連の研究開発成果を社会及び市場等に普及するための環境整備として、ナノテクノロジーの標準化活動（ISO/IEC、JIS）を推進している。

〔広報〕

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。

〔社会受容〕

- ・ナノテクノロジーの産業化の推進とともに、ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響等の潜在的な課題に関する知見を蓄積する等のナノテクノロジーの社会受容に対する取組みを推進している。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子の特性評価手法開発」を開始し、工業ナノ粒子のリスク評価管理手法の確立を目標としたプロジェクトを開始し、2009年10月に「ナノ材料リスク評価書」（中間報告書）を公表した。また、政策的対応として、2009年3月に取りまとめた「ナノマテリアル製造事業者等における安全対策のあり方研究会」報告書に基づき、ナノマテリアルの製造事業者等における自主的な安全対策を促進するための情報収集・開示プログラムを実施している。
- ・OECDでは、2006年9月、化学品委員会に工業ナノ材料作業部会（WPMN）が設置され、代表的な14種の工業ナノ材料について、試験計画の合意と試験実施を目的とする「スポンサーシッププログラム」が実施されている。スポンサーシッププログラム対象物質のうち、カーボンナノチューブ（単層、多層）、フラーレンの3物質については日本が中心となって担当し、「ナノ粒子の特性評価手法開発」等の成果で貢献している。

〔人材育成〕

- ・独立行政法人産業技術総合研究所は、「ナノテク製造中核人材の養成プログラム」を実施し、情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できる人材」の育成を行っている。
- ・NEDOでは、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人

材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取り組みを実施している（NEDO特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施している。

〔関係機関との連携〕

- ・ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち新材料・新構造ナノ電子デバイス、希少金属代替材料開発プロジェクトにおいては、文部科学省との合同会議を設置するなど、連携しつつプロジェクトを推進している。
- ・経済産業省・文部科学省が協力のもと、平成21年6月より産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学が中核なり、茨城県つくば市において世界的なナノテク研究拠点を形成するための「つくばイノベーションアリーナ(TIA nano)」構想が推進されている。ナノエレクトロニクス、カーボンナノチューブ、ナノ材料安全評価などの研究領域、ナノデバイス実証・評価ファウンドリーなどのインフラを生かし、主要企業・大学との連携網を広げ、産学官に開かれた融合拠点として、ナノテクの産業化と人材育成を一体的に推進することとしている。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (15) 平成21年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成20・03・24産局第1号）は、廃止。
- (16) 平成22年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成21・03・27産局第2号）は、廃止。

(2) 研究開発目標の妥当性

「超高純度金属材料」は、耐食性、靱性、加工性等従来の材料と比較し遙かに優れた特性を有しているが、産業化に当たっては、発電プラント等での利用を想定すると材料を大量に使用することから、材料の低コスト・量産化が必須である。

そこで、本事業では、以下の研究開発目標の達成が必要であると考えます。

- ①優れた特性を維持したFe-Cr系合金等超高純度金属材料の低コスト・量産化技術開発（純度については、不純物総量(C, Si, Mn, P, S, Al, N, O等)が数十ppmレベルを想定)
- ②開発材が現用材(ステンレス鋼、Ni基超合金等)以上の優れた材料特性(耐環境性等)を有することの確認
- ③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の確認
- ④現用部品と比較した実用性向上の確認
例えば、
 - ・ボイラ用構造部材については、実際環境での耐久性試験により、現用材のステンレス鋼より優れていることの確認
 - ・ガスタービン動翼については、強度、耐環境特性が現用材のNi基超合金等より優れていることの確認
- ⑤性能／コスト比 が現用材より優れていることの確認
[想定するコストレベル]
 - ・大型重要構造部材(火力発電蒸気配管等)用: 数千円/kg
 - ・小型高付加価値部材(ガスタービン動翼等)用: 数万円/kg

本事業の目標達成により、超高純度金属材料を利用した設備の信頼性向上による安全・安心社会の構築及びエネルギー効率向上に伴うCO₂削減による環境問題対応への貢献が期待される。

以上のとおり本事業は、今後の超高純度金属材料の産業化に向けて先導的な役割を果たすと考えられ、目標として妥当であると考えられる。

(3) 研究開発マネジメント

公募を行い最適な研究開発体制を構築する。なお、本事業に当たっては、重電、鉄鋼メーカー等の他、超高純度金属材料のユーザー的立場である電力会社等の参入を図り、必要性能の見極めや実使用条件での実証、評価等を含む産業化に向けた研究開発を進めることが有効であると考えられる。

事業内容については、技術開発の状況を勘案し、今後設置する委員会において、年数回、適宜審議する。

また、プロジェクトリーダーの設置については、実施体制を勘案して検討する。

なお、プロジェクト開始後3年目に中間評価を実施し、その結果を反映して事業全体の進め方を見直す予定。

(4) 研究開発成果

高温、過酷環境下の発電用構造部材に、現用材に比し耐久性と信頼性が大幅に優れた超高純度金属材料を適用することは、発電プラントの信頼性向上、並びにそれに伴う電力の安定供給に著しい効果をもたらすことで安心・安全な社会構築に資することとなる。また、プラント運転温度の高温化が可能となることから、

発電効率向上(蒸気温度が数十°C上昇した場合プラント効率が2~3%向上)による燃料消費量並びにCO₂削減が可能となり、地球環境問題への対応に大きく寄与できる。

(5) 実用化・事業化の見通し

本事業では、超高純度金属材料の産業化のため低コスト・量産化技術を開発するとともに、試作超高純度金属材料の産業化効果を実証するものであり、目標が達成されれば、用途は幅広く、新たな発電並びに素材産業創製の可能性もあり、更には安心・安全な社会の構築には欠かせない材料として、世の中に受け入れられれば、社会貢献に資することが出来る。

ただし、超高純度金属材料の産業化には克服すべき技術的な課題が多いことが予想され、本事業終了後に即座に実用化が達成されることを目指すのは難しい。本事業により、性能／部品コスト比が現用材と比較し優位性を持つとの目処をつけ、その後に製品ごとの商品化研究を進め、事業化を図ることとなる。

(6) その他特記事項

本事業は関連プロジェクトである「ナノメタル技術」で得られた成果を十分に利用していくこととする。

「ナノメタル技術」の主な技術開発内容は、以下のとおりである。

- ①金属材料中の不純物をナノレベル下で精密に低減する高純度化技術
- ②有用金属(タングステン、チタン等)を精密添加する技術
- ③結晶粒の精密制御技術
- ④結晶粒内析出物や粒界析出物の精密制御技術 等

なお、以上の技術で開発した超高純度金属材料(合金含む)の耐食性、耐久性、加工性など従来の材料から遙かに優れている特性を見い出してきた結果が、本事業の基礎的知見となっている。

5. 総合評価

本事業は、超純度金属材料の産業化の課題である低コスト・量産型の材料製造技術を開発し、試作材料の産業化効果を実証するための実機試験を行うもので、超純度金属材料利用設備の信頼性向上、エネルギー効率向上、安全・安心社会の構築及びCO₂削減による環境問題対応への貢献が期待されることから、重要な技術開発である。

また、「超高純度金属材料」は新しい材料であり、産業化のためには広範な研究開発要素が内在しているため、産学官の連携のもと統合的、効率的に研究開発を進めていく必要があることから、NEDO技術開発機構の委託で実施すべき事業である。

超高純度金属材料の産業化研究

研究目的

○背景

我が国発信の「超高純度金属材料」は、強度、靱性、耐食性、並びに経年安定性に優れた革新的金属材料であり、従来の金属材料を圧倒する優れた特性が明らかになっている。(別図参照)

この超高純度金属材料を産業化することで、我が国の発電、素材産業の競争力が大幅に向上するとともに、環境負荷低減(発電機器の高効率化によるCO₂削減)、並びに安全・安心社会への貢献(発電設備の信頼性向上)が可能となる。

しかしながら、現状、超高純度金属材料のコストは著しく高いため、産業化することは困難である。

○目的

超高純度金属材料の産業化のため、低コスト・量産型の材料製造技術を開発するとともに、試作材料の特性評価等を行い産業への適用性を実証することを目的とする。

プロジェクトの規模

○研究開発期間と研究予算(目安として)

研究期間:平成17~21年度までの5年間
総事業費:19億円(平成17年度事業費:2億円)

研究内容

○研究開発課題

- ・各種伝熱管、圧力容器等の発電設備の大型重要部材、タービンブレード等の小型高付加価値部材への適用を目指し、汎用原料から超高純度金属材料(Fe-Cr系合金等)を低コストで量産する精錬技術や鍛造技術等の開発
- ・低コスト・量産型高純度金属材料を用いた部品製造技術の開発
- ・産業への適用性を実証するため、各種材料特性データ取得、実機相当部品の試作・検証、並びに実プラントでの耐久性試験等を実施する。

○目標・技術開発のポイント

- [目標]:優れた特性を維持した超高純度金属材料の低コスト・量産化技術の開発
(純度については、不純物総量(C,Si,Mn,P,S,Al,N,O等)が数十ppmレベルを想定)
- :開発材の現用材(ステンレス鋼、Ni基超合金等)以上の優れた材料特性を確認
 - :開発材による製品の試作、加工性が現用材と同等以上となる部品製造技術の開発
 - :現用部品と比較した実用性向上の確認(実環境下での耐久性試験等)
 - :性能/コスト比が現用材より優れていることの確認

[技術開発のポイント]

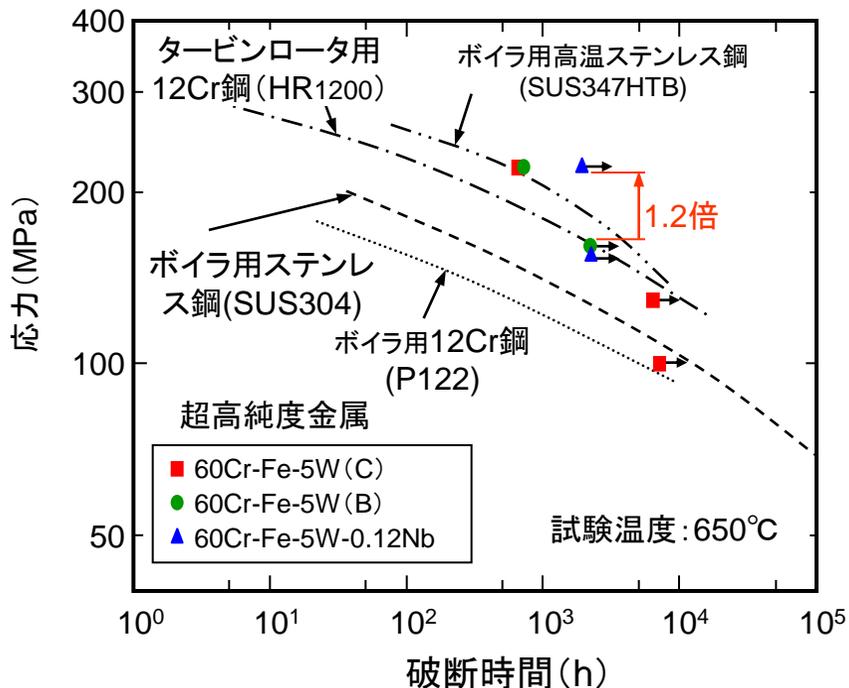
- :汎用原料から量産化する精錬・鍛造等の製造技術開発
- :溶解時の汚染防止のための大型高純度ろつぼの開発
- :優れた特性を低下させない高潔浄接合技術開発

研究成果

- ・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全・安心社会への貢献(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℃上昇し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(CO₂削減等環境問題対策)およ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、廃棄物焚ボイラ等)
- ・分散電源の効率向上による省エネ、CO₂削減並びに快適性向上(対象製品:重油焚小型ガスタービン等)

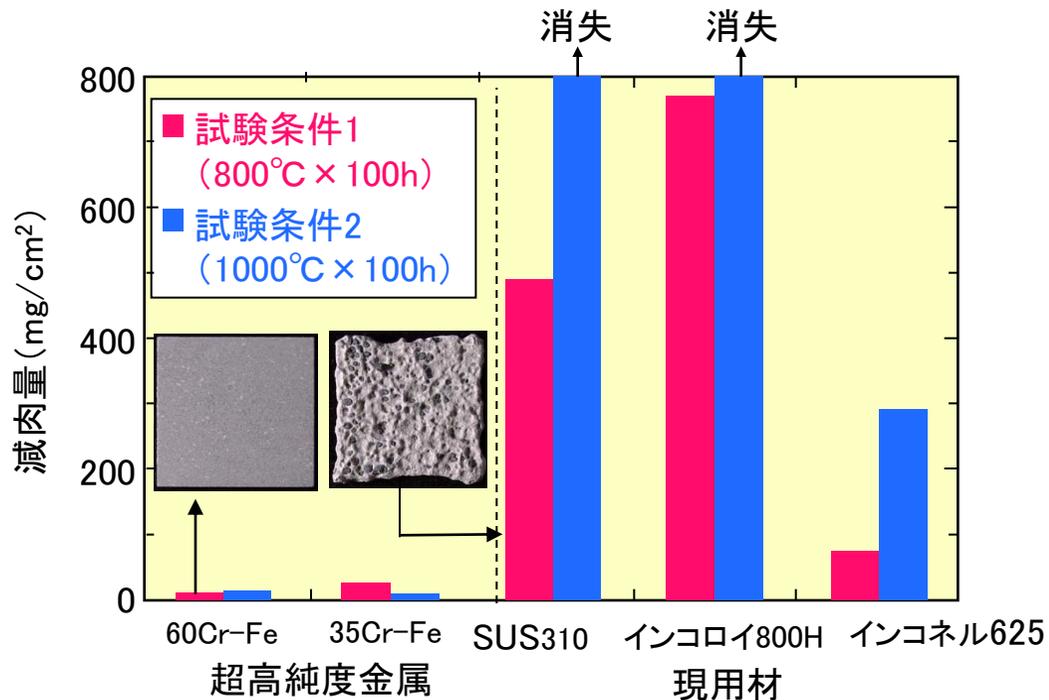
超高純度金属材料の特性

クリープ強度



超高純度金属(60Cr系)のクリープ強度は、
現用発電部材の1.2倍程度

高温耐食性(重油燃焼環境下)

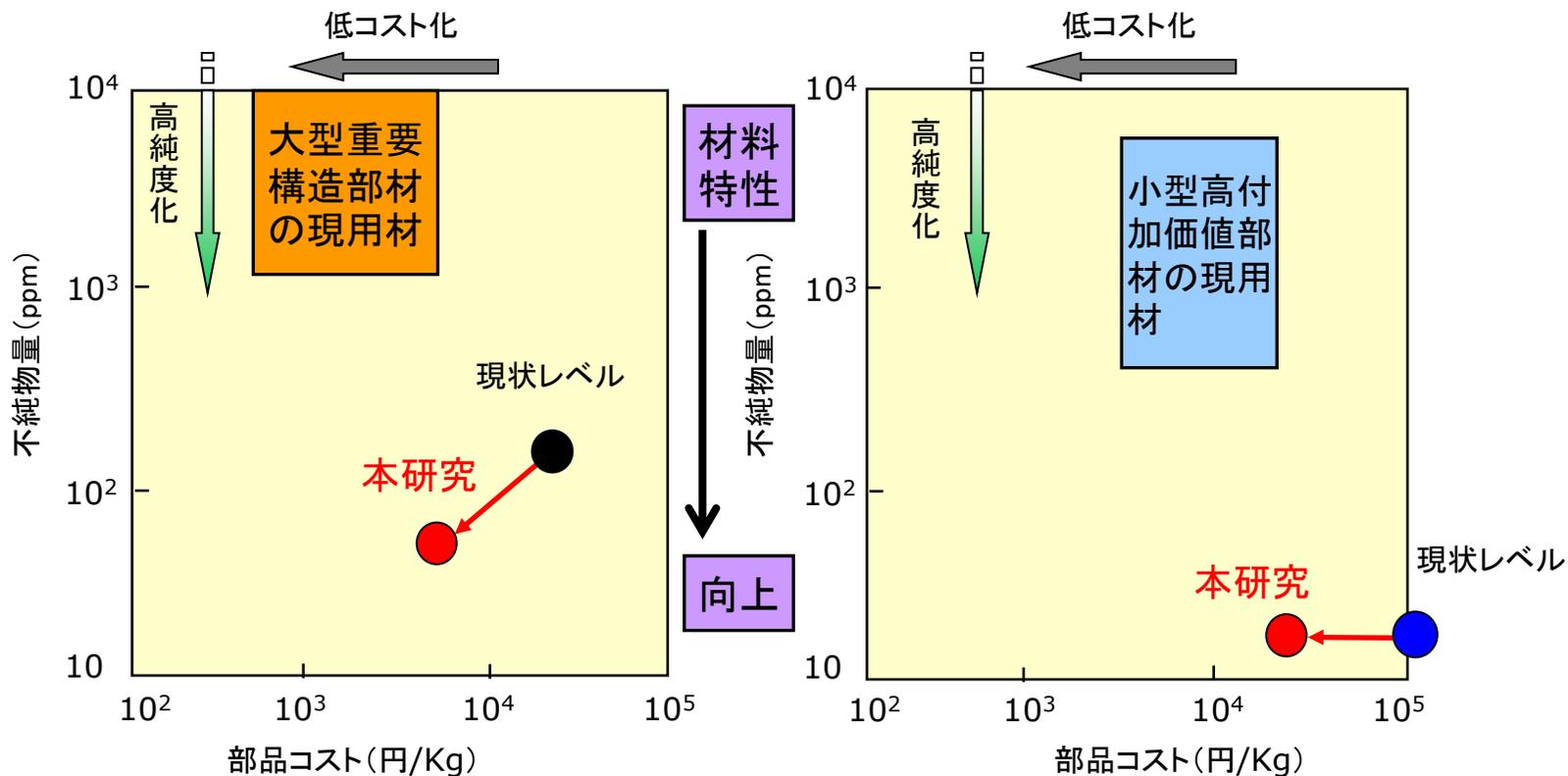


超高純度金属(60Cr系、35Cr系)の高温耐食性は、
現用発電部材の数十倍程度良好

本プロジェクトの目標（コストと純度）

大型部材用溶解技術

小型部材用溶解技術



主要不純物: C, Si, Mn, P, S, Al, N, O