

革新的省エネセラミックス製造技術開発
中間評価報告書
(案)

平成24年3月

産業構造審議会産業技術分科会

評 価 小 委 員 会

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成20年10月31日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成21年3月31日改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施している革新的省エネセラミックス製造技術開発は、高機能中空小型ユニットの一体化技術（ステレオフィブリック）を基軸に、要素技術となる①ニアネット成形・接合技術の開発及び②ユニットの高機能化技術の開発を行いその成果を活用して、③高耐性、高温断熱及び高比剛性に関わる革新的部材の開発を行うことにより、製造装置やシステムの省エネ化と製品の品質向上に貢献できる生産部材用大型複雑形状セラミックスの製造技術を確立するため、平成21年度より実施しているものである。（平成21年度及び平成22年度は新エネルギー・産業技術総合開発機構が執行。）

今回の評価は、この革新的省エネセラミックス製造技術開発の中間評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる革新的省エネセラミックス製造技術開発中間評価検討会（座長：後藤 孝東北大学東北大学金属材料研究所複合機能材料学研究部門教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（小委員長：平澤 洽 東京大学名誉教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成24年3月

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

委員名簿

平成24年1月19日現在

委員長	平澤 洽	東京大学名誉教授
	池村 淑道	長浜バイオ大学 バイオサイエンス研究科研究科長 バイオサイエンス学部学部長 コンピュータバイオサイエンス学科教授
	大島 まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	太田 健一郎	横浜国立大学 特任教授
	菊池 純一	青山学院大学法学部長・大学院法学研究科長
	小林 直人	早稲田大学研究戦略センター教授
	鈴木 潤	政策研究大学院大学教授
	中小路 久美代	株式会社S R A先端技術研究所所長
	森 俊介	東京理科大学理工学部経営工学科教授
	吉本 陽子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 経済・社会政策部主席研究員

(委員敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

革新的省エネセラミックス製造技術開発中間評価検討会
委員名簿

座長 後藤 孝 東北大学金属材料研究所複合機能材料学研究部門 教授

目 義雄 (独)物質材料機構 先端的共通技術部門先端材料プロセスユニットユニット長

茂垣 康弘 (株)IHI 技術開発本部プロジェクトセンター 部長

北條 純一 九州大学大学院工学研究院応用化学部門 教授

丸山 正明 科学技術ジャーナリスト

山口 明良 岡山セラミックス技術振興財団研究所 所長

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省製造産業局ファインセラミックス・ナノテクノロジー・材料戦略室

革新的省エネセラミックス製造技術開発の評価に係る省内関係者

【中間評価時】

(平成23年度)

製造産業局 ファインセラミックス・ナノテクノロジー・材料戦略室 池森 哲雄
(事業担当室長)

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

革新的省エネセラミックス製造技術開発中間評価

審議経過

○第1回中間評価検討会（平成23年12月27日）

- ・評価の方法等について
- ・プロジェクトの概要について
- ・評価の進め方について

○第2回中間評価検討会（平成24年2月13日）

- ・評価報告書(案)について

○産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成24年3月13日）

- ・評価報告書(案)について

目 次

はじめに

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 委員名簿

革新的省エネセラミックス製造技術開発中間評価検討会 委員名簿

革新的省エネセラミックス製造技術開発の評価に係る省内関係者

革新的省エネセラミックス製造技術開発中間評価 審議経過

	ページ
中間評価報告書概要	i
第1章 評価の実施方法	
1. 評価目的	2
2. 評価者	2
3. 評価対象	2
4. 評価方法	3
5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準	3
第2章 プロジェクトの概要	
1. 事業の目的・政策的位置付け	7
2. 研究開発等の目標	11
3. 成果、目標の達成度	15
4. 事業化、波及効果について	36
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	36
第3章 評価	
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	49
2. 研究開発等の目標の妥当性	52
3. 成果、目標の達成度の妥当性	54
4. 事業化、波及効果についての妥当性	56
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	58
6. 総合評価	60
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言	62
第4章 評点法による評点結果	65
参考資料	
今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針	

中間評価報告書概要

中間評価報告書概要

プロジェクト名	革新的省エネセラミックス製造技術開発			
上位施策名				
事業担当課	ファインセラミックス・ナノテクノロジー・材料戦略室			
プロジェクトの目的・概要				
<p>耐熱・耐食性に優れたセラミックスをエンジン鑄造ライン等の大型の配管や槽・容器に適用することで、熱の損失を小さくすると同時に、最終製品への不純物を低減することができる。また現状、高温で使用される生産用部材は希少元素を添加した耐熱合金が多用されているが、軽元素を主成分とするセラミックスの適用は元素戦略上においても意義がある。液晶・半導体製造ラインでは、軽量で剛性の高いセラミックスを大型の精密生産用部材として活用することで、製品のスループットの更なる向上や微細加工化が可能となる。今後の各種製造における品質と生産性の飛躍的な向上に向けて、セラミックス部材も大型化だけでなく、より軽量で高い剛性、あるいは難濡れ性や断熱性の向上といった高機能化が求められている。こうした要求に応じていくには形状付与の自由度を高める必要があるが、従来の一体型のセラミックス成形技術では対応が困難であり、その解決を図るため、高機能化された小さな精密ブロックを作製し、立体的に組み上げ、高効率で接合・一体化して所望とする大型（巨大）化・複雑化・精密性全てを満たした部材を得ることのできる革新的なプロセス技術の開発が必要である。</p> <p>環境と経済の両立に向けて、優れた機能や付加価値を持つ製品を高効率で製造できる技術開発が急務である。ここで自動車部品や液晶といった最終製品と製造機器用の生産部材はセットであり、最終製品の品質を左右することになる。軽量で耐熱性に優れたセラミックス生産部材を有効に使用することで高品質の製品を高効率で製造することができる。本プロジェクトでは従来ファインセラミックス材料では作製が困難であった複雑形状や大型化を容易にし、製造プラントの省エネ化と製品の品質向上に貢献しうる革新的省エネセラミックスの製造技術を開発することを目的とする。</p>				
<p>予算額等（委託及び補助（補助率：1/2）） （単位：千円）</p>				
開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成21年度	平成25年度	平成23年度	平成26年度	民間団体等
H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額
240,000	168,000	310,000	718,000	828,129 (NEDO 執行時の 加速財源含む)

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

個別要素技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
ニアネット成形・接合技術の開発		接合部材設計技術を開発し、同設計に指定された精度、形状を得るための成形方法、及び焼成条件を確立する。	焼結収縮挙動を三次元的に把握、収縮挙動を石膏型の設計に反映、得られた焼成体を三次元的に測定し、作製したAT中空ユニットは平均値で誤差1.5%以下達成。鋳込み製法における焼結収縮挙動の把握・反映技術を確立した。	達成
	断面積が 2500mm^2 の試料を用い、接合強度が 150MPa 以上の接合部材を開発する。	部分加熱や固体反応利用などの接合機構を明らかにするとともに、断面積が 12mm^2 の試料を用いて接合強度 200MPa 以上の接合部材を開発する。	用途に応じた各種セラミックスについてほぼ母材強度相当の接合強度を得た。 ① SN: 接合温度 1600°C において、接合体曲げ強度 677MPa の最大値を示した。 ② B_4C : 加工傷を卑金属の超浸透現象と反応で治癒し、母材と同等の接合強度(250MPa)を実現。 ③ SiC系複合材外部からのSiアシストをせず、含有する遊離Siを利用して接合する技術を検討し、 412MPa の強度を得た。 ④ その他材料の接合強度	達成

			SiC:215MPa, Al ₂ O ₃ :214MPa ⑤ 断面積が1250mm ² の試料を用い、接合強度が200MPa以上を得た。	
	省エネ型接合法により、セラミックスを同種系統の材料で接合した系において断面積が12mm ² の試料を用いて接合強度300MPa以上の接合部材を開発する。 長さ500mm以上の接合部材を対象とした非破壊検査手法を確立する。	固相反応や自己伝播する発熱反応などを用いた高強度接合を実現するため、反応剤・接合剤の厚み、組成、処理温度、自己伝播速度、断熱燃焼温度などのプロセス因子が接合強度に及ぼす影響を検討し、本プロセスによる接合構造の最適化を確立する。	・ B ₄ C/Al 間の固相反応、浸透機構と接合温度との関係を検討し、接合層厚みや接合温度の最適化を行った。 ・ Si-SiC 焼結体の接合において、含有する遊離Siを利用する技術を検討。分子動力学法によるシミュレーションより、ホウ素存在下でSiの移動が抑制される現象を確認。接合厚みの増加に伴い接合強度は減少し、炭素のみでの接合では接合厚みを15μm以下とする必要がある。温度、雰囲気についても最適条件を見出した。 ・ Al ₂ O ₃ 同士を燃焼合成で接合する場合、Al粒子径が40μm以下のTiO ₂ -Al系にガラス質成分を添加し、全体加熱反応誘導モードで昇温速度10℃/分で燃焼合成を実施することにより、850℃以下での反応誘導温度で約200	達成

			μm の接合層を有する均一接合を達成した。	
ユニットの高機能化技術		Al 合金溶湯に対する濡れの機構を説明する。	Si_3N_4 結合 SiC セラミックス (SINSIC) において、 Si_3N_4 の方が SiC よりも優先的に反応する機構を熱力学的に説明し、SINSIC を適用する際の課題を明らかにした。また、Al 合金溶湯と接触する面は、少なくとも熱力学的安定相にすべきであることを確認した。	達成
	接合部を有する部材を用いて、アルミ溶湯中に 100 時間浸漬した後に実質的に反応が認められない接合部材を開発す。	Al 合金溶湯中に 100 時間浸漬した後に実質的に反応が認められない素材を開発する。	多層コーティング (MgAl_2O_4 / Al_2O_3 / 非晶質 SiO_2 / SINSIC 基材) により、Al 合金溶湯中に 100 時間浸漬後もコーティング最表面と合金が容易に剥離し、実質的に反応が認められないことを確認した。なお、 Al_2O_3 / 非晶質 SiO_2 からなる中間層を付与する際に、これら物質の相転移を同時に制御することで、コーティング層全体の基板に対する密着性を向上させた。	達成

	接合部を有する部材を用いて、900℃にて、鋼板相当の鉄と転がり摺動させたときに、鉄に含まれていた成分と実質的に反応しない接合部材を開発する。	900℃にて、鋼板相当の鉄と転がり摺動させたときに、鉄に含まれていた成分と実質的に反応しない素材を開発する。	高温相反応実験を行い、YAGと β -SiAlONが鉄に含まれている成分と反応しないことを確認した。そこで、YAGと β -SiAlONからなる複合体の作製を試みた。冷却時に1600℃でアニールすることでYAG/ β -SiAlON複合体の作製に成功した。これと高張力鋼板を900℃で接触させながら焼成した結果、両者に反応相の生成は認められなかった。	達成
	接合部を有する部材を用いて、700℃以上の温度域の反射が80%以上の接合部材を開発する。	700℃以上の温度域の反射率が80%以上の素材を開発する。	MgAl ₂ O ₄ と複合酸化物Aの組み合わせは、異相界面における輻射熱エネルギーの反射により、700℃の輻射熱エネルギーが最大となる波長3 μ mにおいて全反射率が80%であることを確認した。 複合酸化物A前駆体溶液に含浸したAl ₂ O ₃ 基多孔質シートを焼成して複合化を図ると共に、この製造工程を介してシートがSINISIC基材に接着可能であることを確認した。	達成
革新的省エネセラミックス	900℃の環境下に曝した後において、接	900℃の環境下に曝した後において、接	250mL x ϕ 58mm の窒化珪素管での接合	達成

<p>の部材化技術 開発 a) 高耐性部 材</p>	<p>合面に剥離、クラックが生じない長さ500mm以上、直径100mm以上の管状接合部材を試作する。</p>	<p>合面に剥離、クラックが生じない長さ250mm以上、直径50mm程度の管状接合部材を試作する。</p>	<p>試作を実施した所、接合面に剥離及びクラックは生じないと共に900℃のサイクルテストでも十分接合強度を有する事も確認された。</p>	
<p>革新的省エネ セラミックス の部材化技術 開発 b) 高温断熱 部材</p>	<p>700℃以上のアルミ溶湯を内部に入れた状態で湯漏れがなく、同等の搬送容積をもつ従来部材に比べて、断熱性が2倍、空状態とした部材単体の重量は1/2以下である、直径が500mm程度の槽状部材を試作する。</p>	<p>700℃以上のアルミ溶湯を内部に入れた状態で湯漏れがなく、同等の搬送容積をもつ従来部材に比べて、断熱性が2倍、空状態とした部材単体の重量は1/2以下である、直径が250mm程度の槽状部材を試作する。</p>	<p>φ250mm相当の円筒容器を作製し、アルミ溶湯の漏れがないことを確認した。また、φ250mmの球体容器を試作し、熱流束、重量とも従来容器の1/2以下であることを確認した。直径φ600mmの容器を試作した。性能は以下の通り。 重量：35%減 保温性：30%上 湯漏れ：若干あり(出湯口部付近) 搬送容器の製造、使用、廃棄に関してエクセルギー解析を実施し、省資源・省エネ効果において優位性を付与できる条件を明らかにした。</p>	<p>達成</p>

革新的省エネセラミックスの部材化技術開発 c) 高比剛性部材	長さ（奥行き）が400mmで、従来相当の部材に比べて、撓み量が70%以下である盤状部材を試作する。	長さ（奥行き）が200mmで、従来相当の部材に比べて、撓み量が70%以下である盤状部材を試作する。	高比剛性で鋳込み成形可能な反応焼結SiC-B ₄ C素材を開発し、さらに、集中研で開発した反応焼結接合を用いて200mmの盤状接合体を試作した。開発素材の鋳込み成形性の改良により400mmの大型リブ構造部材のニアネット成形体を試作した。さらに、接合部材の応力変形シミュレーション解析より撓み量60%を達成できることを確認した。	達成
-----------------------------------	---	---	--	----

(2) 目標及び計画の変更の有無 無

<共通指標>

論文数	特許等件数 (出願を含む)
17	18

評価概要

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

対象とするセラミックス部材の高効率大型化技術開発が産業界の広い意味での省エネ化に資するとの本事業の目的は明確であり、省エネルギー技術戦略 2011 に則った本事業の政策的な位置づけは妥当である。

また、本技術開発は、セラミックス構造体の大型化を目指したもので多様な分野への適用が可能な実用性の高い技術であり、構造用材料に用いるための接合技術は不可欠である。接合技術の基礎的研究から、部材開発までの一連の研究を実施することにより、国際的な製品競争面での高付加価値化などで優位になるものであり、公的研究機関と企業との密接な連携のためには国の関与が必要である。

セラミックスの場合にはスケールアップが必ずしも容易ではなく、大型化のための解決方法及び大型化したときの信頼性を確保できるのかなどを検討する必要がある。

また、省エネルギーをエクセルギー等、何らかの指標を用い、ある程度定量的に示す必要がある。委託事業及び補助事業の予想成果が、省エネルギー技術戦略のうち、いつ、どの程度寄与するのかを事業全体として明示すれば、政策全体での位置付け、重要性をよりわかりやすく表現できると考える。

更に接合技術が波及、拡大するような取り組みも必要であり、可能な限り他の産業分野に応用が可能になる知見を提供できるものであることが望まれる。

2. 研究開発等の目標の妥当性

目標値の設定は、十分な基準値が設定されている。既存製品のベンチマークを踏まえた、製品化を意識した具体的な研究項目が設定されており、その指標も具体的であり、指標を達成するための計画が十分に練られており、中間時点としては適当な値となっている。

また、委託事業から時間を置かず実部材を開発する補助事業を各企業が推進するという新しい開発体制の構築により、委託事業での“基礎研究成果の製品化”を実施している。

ただし、目標設定について形状を大きくした際の最終目標値の、接合強度、断面積との関連性、大型形状のときの欠陥の増加及び破壊確率の増大についてどのように計算できるのか、根拠を明確にする必要がある。

集中研として研究成果を上げた基盤研究成果は、今後、委託事業を担当した企業以外の国内企業に、どのように基盤研究成果を技術移転していくのかという方法論も明確にしておくべきである。委託事業に参加していない国内のセラミックス部品の製造企業などに、基盤技術研究の公表可能な部分を技術移転していくのか、実施者の技術組合及び産総研として方針を明確にすべき。また、今後は本事業で想定している製品以外にも応用できるようにすることを目標とした開発が求められる。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

それぞれの実施テーマ（高温断熱、高比剛性等部材）について、すでにプロトタイプが作製されており、実用化に向けた取り組みが着実に進んでおり、中間評価時点で、基盤研究としては十分な成果を上げたといえる。

数値目標は、全ての項目で達成しており、中には、かなり凌駕しているものもある。全体として、目標の達成度は高く、接合強度の幾つかは、世界最高と言ってもよく、接合体の組み合わせによって、従来、想像もできなかったセラミックス構造体が得られており、実用化に向けて大きく進展しつつある。

一方、より実用化の可能性を高めるため、次の段階のさらなる大型化に向けた問題点の抽出、その対策についての施策を提示することが必要である。

最終的な実用化にとって、コストの検討は重要であり、製作時及び使用時などで多くの破損の可能性があり、それらが、全てコストに反映されるため、妥当な範囲のコストで目標値を達成できているのかの検証が必要である。各課題全体での省エネ効果はどうだったかの具体例を示すことも重要である。

接合一体化技術をセラミックス大型化の将来の幅広いニーズに継続して呼応していくためには、標準化を含めて産業界でより幅広く使える技術手段としていくことも必要である。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

セラミックスの接合による大型構造体の作製にほぼ目途が立ったことは、事業化を見通す上で大変期待が持てる。接合強度も十分であり、世界最高レベルのセラミックス構造体が作製されている。個々の補助事業において、具体的な事業化のイメージが提示されており、日本のセラミックス技術が世界最高レベルであることを伺わせる。

本事業では補助事業によって、各担当企業が事業化を決断できる出口目標のプロトタイプを開発し、事業終了後に自社で事業化計画を進めることが“事業化見通し”といえるため、担当企業各社は事業化見通しを立てるために、十分な中間目標を達成したと評価できる。

一方、アルミニウム溶湯球状容器について、軽量、断熱性に優れていると思えるが、アルミニウム溶湯の搬送以外の、さらに高温での過酷な条件で使用される高温容器としての発展の見込みがあるのか、今後こういった波及効果も念頭において開発を進めて欲しい。実用化のための問題点、解決すべき事項、ロードマップをもっと詳しく、具体的に示す必要があるのではないか。

中間評価時点で、その後の特許の審査請求件数の見通しがあいまいな点は、特許出願時に特許戦略を十分には練り上げていないということに起因すると推定される。今後の一層のグローバル化対応では、研究開発時点での戦略立案能力が問われる可能性があるといえる。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

研究開発実施者の実施体制・運営について、進捗管理票を用いたり、技術推進委員会で定期的に集中討議や推進会議を開催するなど、産学官が効率的に研究開発を遂行するのに適したフレキシブルな運営体制を実践しており事業の進捗管理マネジメント面で優れていると評価できる。

集中研方式の委託事業と各企業による補助事業をスタートさせ、省エネ技術を対象とした技術開発は具体的であり、出口イメージを明確化したセラミックス部材の開発に目標を設定する研究開発体制が効果を上げた。

研究経費はほぼ適切で、経費に見合った成果が得られており、大きな費用対効果が期待される。

高度のノウハウを伴う技術、特許性の高い技術に対する知的所有権を共有する場合の問題はどのように解決しているのか説明が必要である。

集中研方式の委託事業で築いた基盤技術を、技術組合に参加していない企業にどう技術移転していくのかという波及効果面での仕組みについて議論を進める必要がある。

6. 総合評価

日本が1980年代から築き上げてきたセラミックス利用技術の研究が発展途上国などで活発になっている国際的状況下において、このような画期的とも言える接合技術が実用化しつつあることは、日本の産業の復活・再生にとって大変好ましいことであり、日本の製造業の競争力強化を図ると同時に、国内のセラミックス部品の製造企業にグローバル化に対応した事業のあり方を提示した点で、成果を上げている。

セラミックスの構造用部材への応用を妨げているのは、大型構造部材の製造の困難さが一因であり、高度な接合技術はそれを可能にする最短の方法である

国の支援により、セラミックス接合技術を中心としたプロジェクトが行われることは意義が大

きく、もし、この時機を逃すと、日本全体でのセラミックス研究者の数、レベルの低下により、このような高度な技術革新は不可能だったと思われる。

本事業は開発製品がかなり絞られており、さらに今後の種々の部材開発に波及できる可能性があり、セラミックスを活用した様々な省エネ部材開発へと展開し、早期の製品化を大いに期待したい。

一方、補助事業は、実用化を目指したものであり、実用化のための問題点の抽出、大型化の問題点、さらに、ロードマップをより明確にし、市場動向を見据え、コスト計算、省エネ効果などを定量化し、費用対効果のある研究開発が必要である。

事業化を意識した効果的な特許の出願を、国内に留まらず積極的に進めていって欲しい。

また、中空ユニットの組み合わせによる球状容器の構成は興味ある開発であるが、繰返し使用される場合や局所的な損傷が生じた場合など、修復（ユニットの取替など）が容易にできる方法も合わせて開発しておく必要性があると考えられる。

7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

○セラミックスは、基本的に脆性材料であり、実用化のためには破壊の確率的論的な解析による信頼性の確保が重要である。本プロジェクトでの成果は中間段階で接合の可能性を実証しているが、今後はより詳細に信頼性を向上するための接合体の破壊論による寿命予測、非破壊検査技術の向上まで含めた研究に発展させる必要がある。

○早期の実用化にリソースをかける意義がある一方、セラミックスの大型化に伴う基盤技術開発の深化にも未だ多くのリソースが必要である。

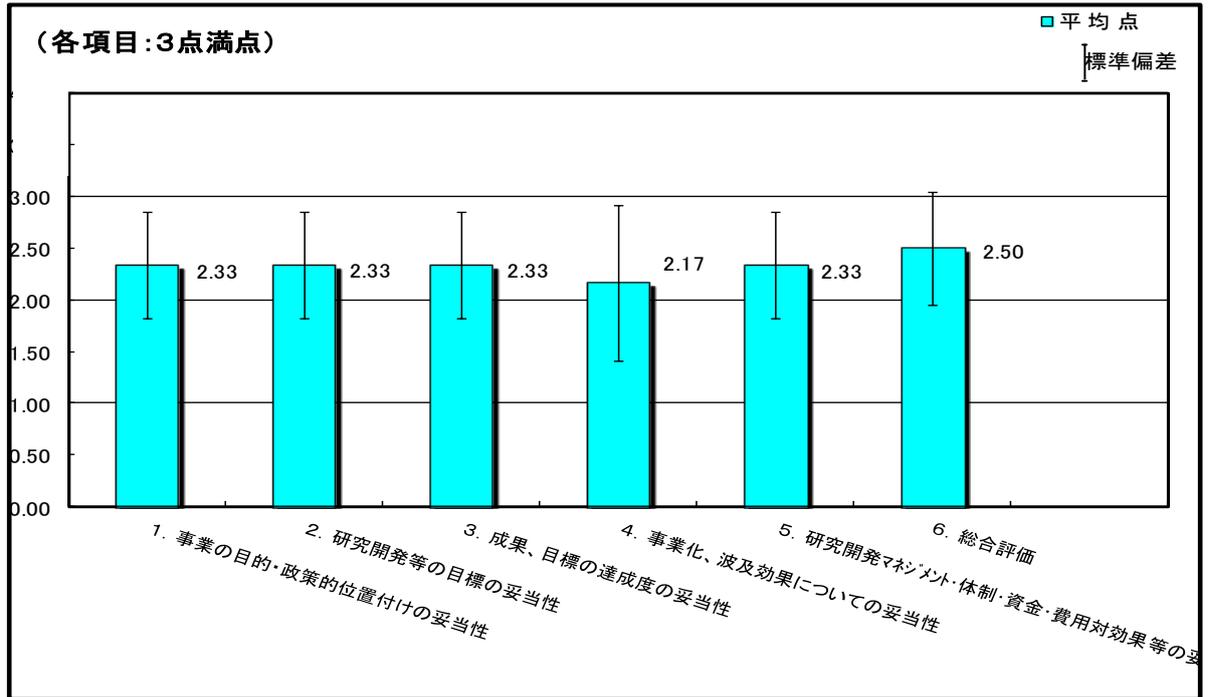
○本事業の研究実績をできるだけ公表することにより、研究分野として拡大することができれば、セラミックス産業のさらなる発展が期待される。

○補助事業を担当した企業は、早めにショートサクセスとしての製品化を実現し、企業内での事業化に向けた態勢固めを強く図ると同時に、ショートサクセスとして製品化したセラミックス部材を早くユーザー企業に提出することで、産業間エネルギーネットワークを拡充する態勢固めを進め、日本の製造業の競争力強化につなげて行くことが望まれる。

○公的な研究機関である産総研は、本事業の基盤研究成果を基に、セラミックス利用分野でのオープンイノベーション体制のハブとして、日本の製造業の技術力向上を支援してほしい。

○より効果的な波及効果が生み出されるよう特定の形状のみならず、用途や使い易さを考慮して、部材の組み合わせなどにより容器の形状も部分的に変えることが可能であったり、より耐食性と断熱性を同時に備えた部材などの開発も望まれる。

評点結果



第 1 章 評価の実施方法

第1章 評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」（平成21年3月31日改定、以下「評価指針」という。）に基づき、以下のとおり行われた。

1. 評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

- (1) より良い政策・施策への反映
- (2) より効率的・効果的な研究開発の実施
- (3) 国民への技術に関する施策・事業等の開示
- (4) 資源の重点的・効率的配分への反映

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

- (1) 透明性の確保
- (2) 中立性の確保
- (3) 継続性の確保
- (4) 実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

2. 評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、プロジェクトの目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある6名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省ファインセラミックス・ナノテクノロジー・材料戦略室が担当した。

3. 評価対象

革新的省エネセラミックス製造技術開発（実施期間：平成21年度から平成25年度）を評価対象として、研究開発実施者（ステレオファブリック技術研究組合、三井金属鉱業株式会社、エヌ・ジー・ケー・アドレック株式会社、株式会社 TOTO、美濃窯業株式会社）から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき

評価した。

4. 評価方法

第1回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等及び要素技術について評価を実施し、併せて4段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価室において平成21年6月1日に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価(中間・事後評価)に沿った評価項目・評価基準とした。

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

- (1) 事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
 - ・事業の政策的意義(上位の施策との関連付け等)
 - ・事業の科学的・技術的意義(新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等)
 - ・社会的・経済的意義(実用性等)
- (2) 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
 - ・国民や社会のニーズに合っているか。
 - ・官民の役割分担は適切か。

2. 研究開発等の目標の妥当性

- (1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
 - ・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準(基準値)が設定されているか。
 - ・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

- (1) 成果は妥当か。
 - ・得られた成果は何か。
 - ・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
 - ・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

(2) 目標の達成度は妥当か。

- ・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

(1) 事業化については妥当か。

- ・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

(2) 波及効果は妥当か。

- ・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

(1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。

- ・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。
- ・採択スケジュール等は妥当であったか。
- ・選別過程は適切であったか。
- ・採択された実施者は妥当であったか。

(2) 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

- ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
- ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
- ・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
- ・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

(3) 資金配分は妥当か。

- ・資金の過不足はなかったか。
- ・資金の内部配分は妥当か。

(4) 費用対効果等は妥当か。

- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

(5) 変化への対応は妥当か。

- ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
- ・代替手段との比較を適切に行ったか。

6. 総合評価

第2章 プロジェクトの概要

第2章 プロジェクトの概要

1. 事業の目的及び政策的位置付け

1-1 目的

○背景と必要性

耐熱・耐食性に優れたセラミックスをエンジン鋳造ラインの大型の配管や槽・容器に適用することで、熱の損失を小さくすると同時に、最終製品への不純物を低減することができる。また現状、高温で使用される生産用部材は希少元素を添加した耐熱合金が多用されているが、軽元素を主成分とするセラミックスの適用は元素戦略上においても意義がある。液晶・半導体製造ラインでは、軽量で剛性の高いセラミックスを大型の精密生産用部材として活用することで、製品のスループットの更なる向上や微細加工化が可能となる。今後の各種製造における品質と生産性の飛躍的な向上に向けて、セラミックス部材も大型化だけでなく、より軽量で高い剛性、あるいは難濡れ性や断熱性の向上といった高機能化が求められている。こうした要求に応えていくには形状付与の自由度を高める必要があるが、従来の一体型のセラミックス成形技術では対応が困難であり、その解決を図るため、高機能化された小さな精密ブロックを作製し、立体的に組み上げ、高効率で接合・一体化して所望とする大型(巨大)化・精密複雑化・精密性を鼎立した部材を得ることのできる革新的なプロセス技術の開発が必要である。

○目的

環境と経済の両立に向けて、優れた機能や付加価値を持つ製品を高効率で製造できる技術開発が急務である。ここで自動車部品や液晶といった最終製品と製造機器用の生産部材はセットであり、最終製品の品質を左右することになる。軽量で耐熱性に優れたセラミックス生産部材を有効に使用することで高品質の製品を高効率で製造することができる。本プロジェクトでは従来ファインセラミックス材料では作製が困難であった複雑形状付与や大型化を容易にし、製造プラントの省エネ化と製品の品質向上に貢献しうる革新的省エネセラミックスの製造技術を開発することを目的とする。

○現在の動向

国内では 3.11 震災以降のエネルギー供給に対する危機意識が高まっている。とりわけエネルギー消費の多い産業部門においては、製品競争力を維持しつつ、更なる省エネ化にむけた取り組みが急務となっている。

国外動向をみると、米国では鋳造へのセラミック適用のロードマップが作られている。また韓国や中国では液晶半導体や鋳造用の大型セラミック生産部材開発が国レベルで推進され日本をキャッチアップ、凌駕するための動きが活発化している。こうした動きの中で日本は、環境と経済の両立に向けて新しいプロセスによる高機能(難濡れ、軽量、熱制御性)を、大型セラミック部材を開発することが必要である。

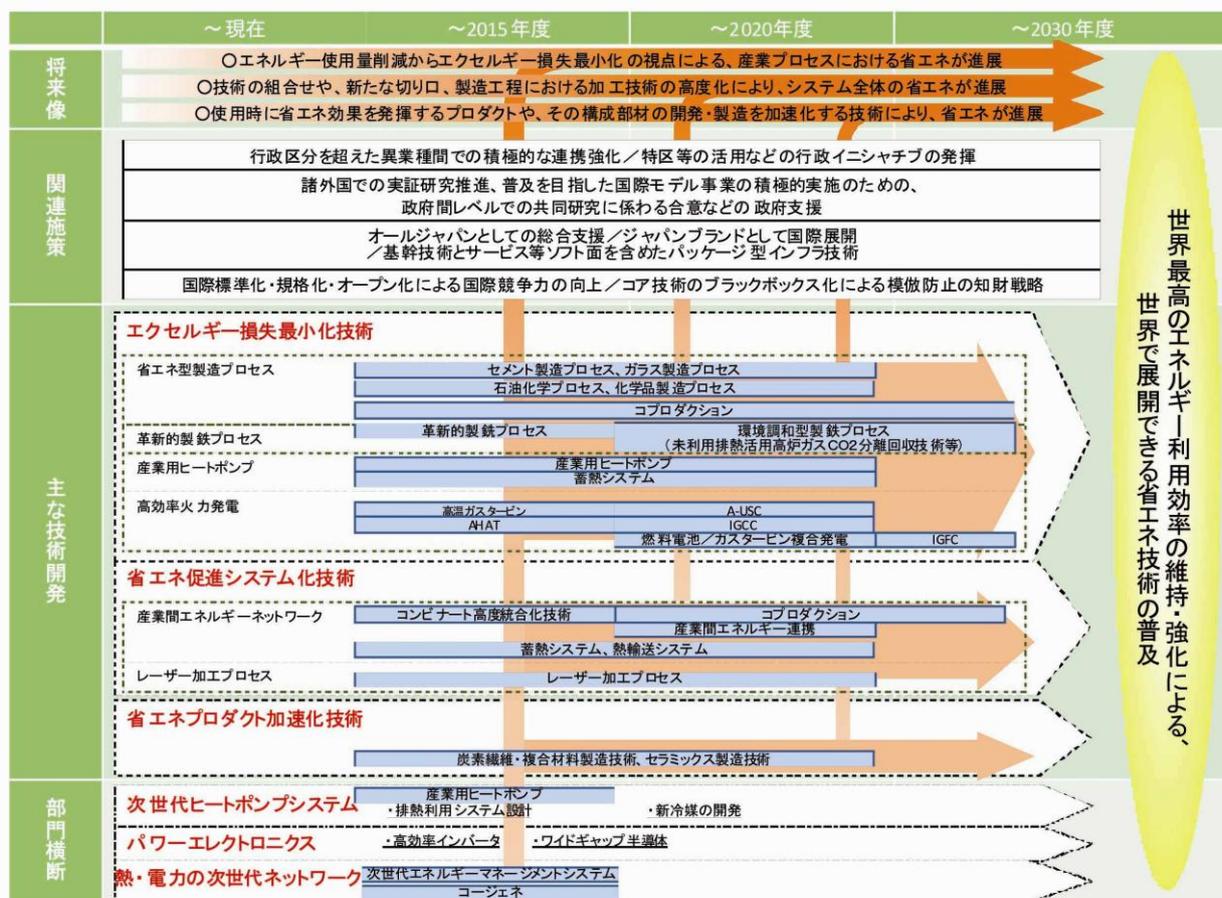
1-2 政策的位置付け

省エネルギー技術の研究開発と普及を効果的に推進するため、経済産業省と NEDO により策定された「省エネルギー技術戦略 2011」において、製造プロセスで省エネを推進する「エクセルギー損失最小化技術」、技術の組み合わせや新たな切り口によりシステム全体の省エネを推進する「省エネ促進システム化技術」、使用時に省エネ効果を発揮する製品やその部材の開発・製造を加速させる「省エネプロダクト加速化技術」が重要かつ基軸となる技術として選定された。

これらの内容と本事業は密接に関連しており、その位置づけは明確である。「省エネプロダクト加速化技術」においてセラミック製造技術が具体例として示され、本事業の内容が引用されている。また「熱・電力の次世代ネットワーク」関連で熱輸送が選定されている他、「エクセルギー損失最小化技術」に向けて本事業ではセラミックスの製造、使用に関わるエクセルギー解析を実施している。

1) 産業部門の導入シナリオ(セラミックス製造技術、エクセルギー損失最小化技術、省エネ製造プロセス、など本事業と深く関係している項目が明示)

産業部門の導入シナリオ図



世界最高のエネルギー利用効率の維持・強化による、世界で展開できる省エネ技術の普及

出所：省エネルギー技術戦略 2011

2) 重要技術シート(セラミックス製造技術の重要性が明示。本事業が事例とされている)

省エネプロダクト加速化技術サブシート(セラミックス製造技術)

技術概要

自動車部品や液晶・半導体等の製品を製造する際に使用される生産用部材は、製品の機能と生産性の向上の観点から、部材の大型化と機能向上が強く求められている。例えば、耐熱・耐食性にすぐれたセラミックスの開発によりエンジン鋳造ラインの大型配管や槽・容器等での熱損失を小さくすると共に、製品への不純物を軽減することができることが考えられるなど、今後の各種製造における製品の品質と生産性の向上には生産部材が鍵を握る。そのため、セラミックス部材も大型化以外に、軽量、高剛性など高い機能化が求められている。しかし、このような要望は従来の一体型のセラミックス成形技術では対応が困難であり、大型・複雑・精密性を兼ね備えた部材を作ることができる革新的なプロセス技術の開発が必要である。そこで、従来ファインセラミックス材料では作製が困難であった複雑形状付与や大型化を容易にし、製造プラントの省エネ化と製品の品質向上に貢献する革新的省エネセラミックスの製造技術の開発を行う。

技術開発の進め方

2010年～
 ・産学連携ネットワークの構築を国が支援(ステレオファブリック技術研究組合の設立)
 基盤技術と限界のある従来製造プロセスではない新規製造プロセスを同時に開発
 2013年～
 ・国の支援により大学・研究機関の技術を民間に移転。
 ・開発成果の性能・経済性に関する優位性の実証を確認
 ・実証研究などは民間主導の開発に移行

技術開発動向

独立行政法人(産総研)と民間企業が共同で参加できることとなった技術研究組合(ステレオファブリック技術研究組合)を通じて、基盤技術と革新的な新規製造プロセスの同時開発を行い、構造用セラミックスの課題解決を行う。このためには、下記の技術開発を実施する。
 ① ニアネット成形 接合技術の開発
 ② コニットの高性能化技術の開発
 ③ 革新的省エネセラミックスの部材化技術開発
 対象とする分野は多岐に渡り、非鉄鋳造分野では断熱軽量槽(溶湯搬送、濾過槽)、工業炉の分野では異形ラジアンチューブなど、鉄鋼分野では搬送ロールなど、半導体液晶分野では大型ステージ、ステージなどが上げられる。

波及効果

熱化学、液晶、半導体製造等の生産部材にセラミックスを応用することで、軽量化、熱を逃がさない、製品への不純物混入減少など製造効率の向上が期待される。具体的には非鉄鋳造、工業炉、液晶、半導体プロセス、化学プラント、鉄鋼など幅広い産業において、従来実現できなかった大型・複雑な部材の製作等が可能になり製造プラントの省エネ化と製造効率向上に貢献できる。また、セラミックス自身の製造工程においても成形・焼成設備が小型化すると共に接合設備も簡素化されることが期待される。

出所:省エネルギー技術戦略 2011

省エネプロダクト加速化技術 技術シート

技術概要

その製造プロセス自体では大きな省エネルギー効果は期待できないものの、使用される際に大きな省エネルギー効果を発揮するプロダクトやそれ構成する部材の、開発や製造を加速化する手法の開発。具体的には、産業部門に幅広い応用が期待されている基盤技術としてセラミックス製造技術や炭素繊維・複合材料製造技術が挙げられる。
 ここでは、主な応用先が産業部門と想定されているものや、部門横断的に広範囲にわたるものうち他の部門に取り上げられていないもの、又は、現在基礎研究段階であって応用先が未確定だが、特定の製造プロセスとして記述できるものを取り上げている。また、最終的に家庭・業務又は運輸部門の重要技術として、直接あるいは包含されて記載されている種々の機能性化学品や中間素材等については、産業部門では省略している。

技術開発の進め方

○ セラミックス製造技術、炭素繊維・複合材料製造技術
 応用品が使用され省エネルギー効果を生む際の、素材としての貢献度の定量化(エネルギー版のLCAともいえる)は現状では一般化される形で整備されていないため、省エネ効果を容易に判定するための調査研究が待たれる。

技術開発動向

現在、非鉄鋳造、工業炉、鉄鋼、半導体などの産業プロセス応用を意図し、大型、軽量、高剛性、複雑形状などの特長を有するセラミック材料の開発は官民共同で行われている。
 また、軽くて強いという特性を有する炭素繊維複合材料(CFRP)やそれを構成する機能性材料である炭素繊維は、航空機等で燃費向上のため既に用いられており、今後、自動車の車体に用いられることにより自動車の軽量化による燃費効率向上が期待できることから、近い将来、自動車分野等において大量需要が見込まれるが、製造エネルギーの大幅削減と生産性の大幅向上を図る必要があり、従来と全く異なる炭素繊維・複合材料製造技術の開発が民間を主体として行われている。

波及効果

基盤技術として、各種製造プロセスに広範な適用が期待される。
 熱化学、液晶、半導体製造等の生産部材にセラミックスを応用することで、軽量化、熱を逃がさない、製品への不純物混入減少など製造効率の向上が期待される。具体的には非鉄鋳造、工業炉、液晶、半導体プロセス、化学プラント、鉄鋼など幅広い産業において、従来実現できなかった大型・複雑な部材の製作等が可能になり製造プラントの省エネ化と製造効率向上に貢献できる。また、セラミックス自身の製造工程においても成形・焼成設備が小型化すると共に接合設備も簡素化されることが期待される。
 エネルギー消費量の高い耐炎化工程を不要とする製造プロセスの確立によって、炭素繊維製造エネルギーの半減及び生産性の大幅向上(約10倍の生産量)が可能となり、CFRTP技術の確立と相まって自動車分野への大量供給が可能となり、自動車分野での省エネ化が図られる。

出所:省エネルギー技術戦略 2011

3)重要技術シート(「熱輸送を用いた熱利用の柔軟化」)の重要性が示されている。本事業の軽量・断熱アルミ搬送容器は熱輸送手段のひとつであり、将来的には高温蓄熱体輸送容器としての転用も考えられ

省エネ促進システム化技術 技術シート

技術概要

技術の組み合わせや新たな切り口による仕組み等(蓄熱や熱輸送を用いた熱利用の柔軟化等)により、大きな省エネを促進すると想定される技術や製造工程における加工技術の高度化によりプロセス全体の手順削減や高歩留まり化を図ることで全体の省エネルギーを実現する技術。従来は部分的な製造プロセス改善により、効を奏してきたものの、更なる改善には限界があるため、さらにシステム全体としての省エネルギーと捉えることで、更なる改善を期待するものである。
 具体的には、コンビナート内での産業間連携(高度統合化)を蓄熱や熱輸送を用いて行うことでエネルギーの有効利用や物質とエネルギーの併産(コプロダクション)等の技術や、後加工工程の省略が可能となるレーザー加工技術の高度化などがある。

技術開発の進め方

技術開発を推進すべきエネルギー技術としては、産業間エネルギーネットワーク、レーザー加工プロセスがある。個別技術との対応関係は以下の通り。

- 産業間エネルギーネットワーク
 - ・コプロダクション、産業間エネルギー連携、コンビナート高度統合化技術
 - 熱輸送システム、蓄熱システム
- レーザー加工プロセス
 - ・レーザー加工プロセス

技術開発動向

産業間エネルギーネットワークを構成する構成要素としての電力制御、蓄熱、熱輸送システム、蓄熱システム、コプロダクションなどについては、従来から技術開発が実施されているが、エネルギーネットワークとして進めるには技術は、各技術を統合する制御技術を含んだ技術の集合体となる。これら蓄熱、熱輸送システムなどの熱融通、および物質融通を組み合わせたシステム化技術については、実証研究などが国により進められている。また、民間企業も技術開発に参画している。
 レーザー加工技術としては、国内の大学・研究所は世界トップレベルの技術開発を行っているが、産業応用については、成熟大規模市場では国内メーカーが健闘しているものの、成長が見込まれる小規模市場で独米が先行している。光源開発と共に加工技術開発を並行して進めることが重要である。

波及効果

エネルギーネットワークは多くの技術により構成され、幅広い国内産業活性化に貢献できる他、特に熱需要の大きい寒冷地での将来の海外展開も期待される。
 コンビナートの構成はもともとエネルギーや物質の融通を念頭においたものであった。廃棄物処理等の熱供給可能施設との連携も含め、さらなる連携を図ることにより、広い国内産業の活性化に貢献できる。日本で培われたコンビナートにおける産業間エネルギーネットワークは、パッケージ型インフラ輸出につながる可能性がある。
 また、レーザー発振器の高効率化、既存装置の高効率レーザーへの置き換えで製造工程の省エネ効果が得られる。特に溶接工程への高効率レーザーの導入による効果は大きい。

る)

出所:省エネルギー技術戦略 2011

1-3 国の関与の必要性

- ・当該事業は科学技術基本計画に記された、目標(環境と経済の両立、ものづくりナンバーワン国家の実現)、ならびに経済産業省が推進している技術戦略マップ(省エネルギー技術戦略2011(前述))に沿っている。
- ・省エネやCO₂削減に国を挙げて取り組まねばならない事態において、経済産業省がリーダーシップをとることができる。
- ・大型部材化技術はリスクが大きく企業のみでの研究では限界である。個別研究では直近の課題解決に向けた開発に取り組むこととなり、長期的に見たセラミックスの競争力を維持することは困難である。
- ・競争力の基盤構築に向け、産官学の連携の基に、基礎から設計そして形状付与技術を融合させながら効率的に開発するためには国による関与が必要である。
- ・当該事業には接合や、ニアネットシェイプ技術などのセラミックス部材化の基盤となる技術が柱であり将来の我が国のセラミックス産業への波及効果も大きい。特に、局所加熱で大型部材ができれば巨大なセラミック部材を製造することが可能となりエネルギー機器をはじめとするイノベーションの創出に繋がる。

1-4 他の制度との関連

- ・当該事業に関する省内や他省庁、民間企業との他の事業の重複はない。

2. 技術開発の目標

2-1 目標・指標

表2-1. 全体の目標

目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
研究開発項目① ニアネット成形・接合技術の開発		
	接合部材設計技術を開発し、同設計に指定された精度、形状を得るための成形方法、及び焼成条件を確立する。	
断面積が2500mm ² の試料を用い、接合強度が150MPa以上の接合部材を開発する。	部分加熱や固体反応利用などの接合機構を明らかにするとともに、断面積が12mm ² の試料を用いて接合強度200MPa以上の接合部材を開発する。	たとえば燃焼合成の可能性を明らかにするレベルとしては妥当と考えた。 体積効果を考慮すると、前項に定めた目標値に対して、1/2倍の値となる(計算に当たってはワイブル係数を8程度との仮定をおいた)。

<p>省エネ型接合法により、セラミックスを同種系統の材料で接合した系において断面積が 12mm² の試料を用いて接合強度 300MPa 以上の接合部材を開発する。 長さ 500mm 以上の接合部材を対象とした非破壊検査手法を確立する。</p>	<p>固相反応や自己伝播する発熱反応などを用いた高強度接合を実現するため、反応剤・接合剤の厚み、組成、処理温度、自己伝播速度、断熱燃焼温度などのプロセス因子が接合強度に及ぼす影響を検討し、本プロセスによる接合構造の最適化を確立する。</p>	<p>製品化されている現状品(一体型)の強度(アルミナを想定)が 300MPa 程度であり、接合体においても同等の強度を設定することが妥当と考えた。 例えば、超音波探傷により全体を把握してから、X線透過法により局所分析を行う。特に、X線透過法においては、広面積検出技術と差分画像処理技術等を融合することにより、従来では困難であった大型構造物の高速且つ高識別度検査を実現する必要がある。以上を実施する上での対象として500mm程度が妥当との判断である。</p>
<p>研究開発項目② ユニットの高性能化技術</p>		
	<p>高温場における溶融アルミニウムに対する濡れの機構を解明する。</p>	
<p>接合部を有する部材を用いて、アルミ溶湯中に 100 時間浸漬した後に実質的に反応が認められない接合部材を開発する。</p>	<p>アルミ溶湯中に 100 時間浸漬した後に実質的に反応が認められない素材を開発する。</p>	<p>反応や移着のない製品が必要とされている。従来品の現場での使用実績において反応は初期に進むが、100 時間とすれば、反応は大凡安定するため、100 時間後浸漬後の変化を観察対象とした。</p>
<p>接合部を有する部材を用いて、900℃にて、鋼板相当の鉄と転がり摺動させたときに、鉄に含まれていた成分と実質的に反応しない接合部材を開発する。</p>	<p>900℃にて、鋼板相当の鉄と転がり摺動させたときに、鉄に含まれていた成分と実質的に反応しない素材を開発する。</p>	<p>反応や移着のない製品が必要とされている。例えば、鋼板中に含まれるマンガン等が酸化されロール表面に付着、鋼板表面が凹凸になるため、薄板化する際のネックになっている。</p>
<p>接合部を有する部材を用いて、700℃以上の温度域の反射率が 80%以上の接合部材を開発する。</p>	<p>700℃以上の温度域の反射率が 80%以上の素材を開発する。</p>	<p>現状品(Si 基系セラミックス)の反射率は 10~20%程度であり、80%以上とすることができれば、部材の低熱伝導率化と中空構造と組み合わせることで断熱性を 2 倍にできる。</p>
<p>研究開発項目③ 革新的省エネセラミックスの部材化技術開発</p>		
<p>a) 高耐性部材</p>		

<p>900℃の環境下に曝した後に おいて、接合面に剥離、クラ ックが生じない長さ 500mm 以 上、直径 100mm 以上の管状 接合部材を試作する。</p>	<p>900℃の環境下に曝した後 において、接合面に剥離、クラ ックが生じない長さ 250mm 以上、直径 50mm 程度の管 状接合部材を試作する。</p>	<p>最終的に、鋼板用搬送ロールやラ ジアントチューブ等の大型管状部 材に適用できる技術開発を目指す 必要がある。</p> <p>1.温度について:搬送ロールを例 にすると、実際の使用温度は600 ～1200℃の範囲であるが、代表値 として900℃を設定し、同温度での 接合体の耐性を満たすことが必要 である。</p> <p>2.部材サイズについて:同じく、実 際の部材のサイズは600～2500L と幅があるが、 接合部を設けた新しい構造体の 基本耐性を評価し、またスケール アップに伴う課題抽出を行う目的 で、中間目標あるいは最終に掲げ た250mm→500mmで十分と考えられ る。</p> <p>実用化においては、一部の企業 はメートルクラスの大型部材の設 備ならびに製造ノウハウを有して おり、接合に関連する課題が助成 事業を通じて解決されれば、その 後企業単独での展開が可能と考 えられる。</p>
<p>b) 高温断熱部材</p>		

<p>700°C以上のアルミ溶湯を内部に入れた状態で湯漏れがなく、同等の搬送容積をもつ従来部材に比べて、断熱性が2倍、空状態とした部材単体の重量は1/2以下である、直径が500mm程度の槽状部材を試作する。</p>	<p>700°C以上のアルミ溶湯を内部に入れた状態で湯漏れがなく、同等の搬送容積をもつ従来部材に比べて、断熱性が2倍、空状態とした部材単体の重量は1/2以下である、直径が250mm程度の槽状部材を試作する。</p>	<p>最終的に中空のセラミックユニットを接着・一体化した新しい構造により、大型(メートルクラス)の、搬送容器及び断熱濾過槽を開発することが必要である。 目標の設定にあたっては、まず、搬送容器とろ過槽の最も基本的な機能である、「湯モレがないこと」を新しい構造体で実証する。次に開発の意義ともいえる「軽量化・断熱性」についてはハードルの高い技術であるが、これらを目標とすべきである。スケールアップについては、課題抽出ができるサイズを段階的に作製すべきである。</p>
<p>本件を代表事例として、製造、使用、廃棄過程を含めた省資源・省エネ効果を定量化する。</p>		
<p>c) 高比剛性部材</p>		
<p>長さ(奥行き)が400mmで、従来相当の部材に比べて、撓み量が70%以下である盤状部材を試作する。</p>	<p>長さ(奥行き)が200mmで、従来相当の部材に比べて、撓み量が70%以下である盤状部材を試作する。</p>	<p>アルミナ系材料では達成できないたわみ量低減を目指す必要がある(両端支持の最大たわみ $=5WL^4/384EI=k/\text{比剛性}$。 最大たわみ量は比剛性に反比例する。たわみ量の比較(従来素材アルミナ AC270を100として) SiC:53, B₄C:39 という計算結果)</p>

3. 技術開発の成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体と個別要素技術の成果

3-1-1-1 全体の成果

セラミックス部材の大型化、複雑形状化を両立させるには、高機能化された小さな精密ブロックを作製し、立体的に組み上げ、高効率で接合・一体化して所望とする大型(巨大)化・精密複雑化・精密性を鼎立した部材を得ることのできる革新的なプロセス技術の開発(ステレオファブリック造形技術)が必要である。図3-1にステレオファブリック造形概念図を示す。同技術を確立するための課題は大別すると、①ニアネット成形・接合技術の開発、②ユニットの高機能化技術の開発、といった基盤・要素研究に加えて、それらを部材として実証する③革新的省エネセラミックスの部材化技術開発、である。

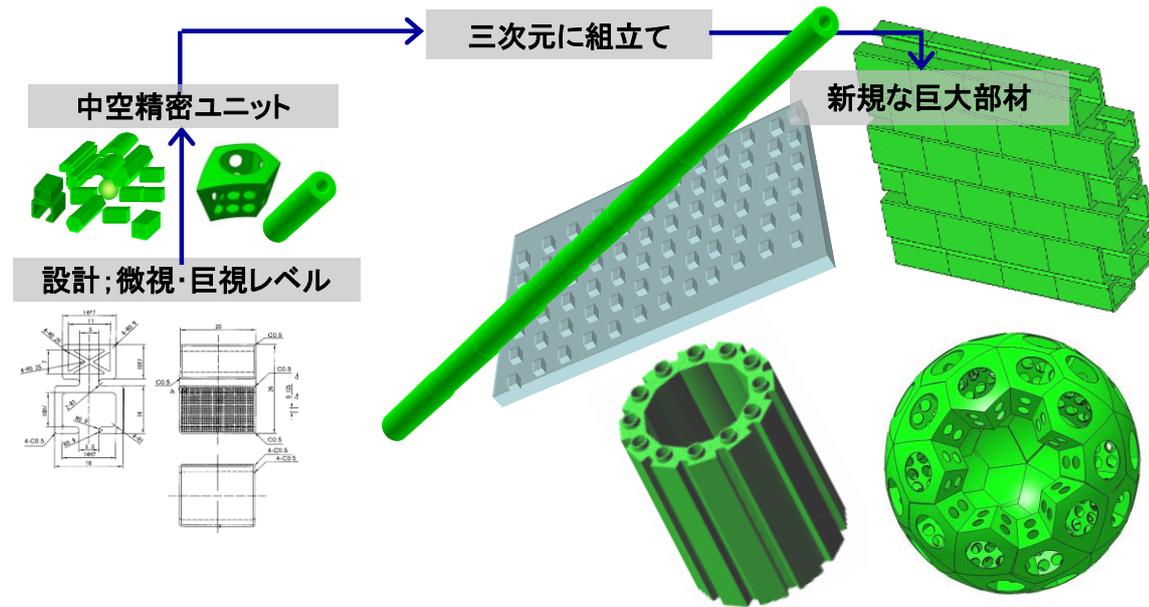


図3-1 ステレオファブリック造形概念図

これらの課題のうち共通基盤となる課題①②については委託事業、そして課題③は補助事業として取り組んだ。また課題③は出口製品に対する、要求性能の共通性から、1)高温断熱部材、2)高比剛性部材、3)高耐性部材に分類した。さらに、これら部材も使用用途により最適な材質が異なるなど本事業で対象としている出口、材質、そして手法の関係はわかりづらい。そこで表3-1には前記課題①②と③あるいは最適と考えた材質の関連を整理することにした。

表3-1 出口、使用条件、要求性能、材質について

◎: 求められる性能や条件

本事業での分類	出口製品と分野	使用温度	軽量性	剛性	断熱性	非濡れ性	省エネ強接合	焼成面ニアネット	要求性能・条件を考慮し、選定、或いは開発した材料
1) 高温断熱部材	・アルミ溶湯搬送容器 ・蓄熱体可搬容器 (非鉄鑄造、エネルギー、化学)	7~800℃	◎		◎	◎		◎	低熱伝導・反応焼結窒化ケイ素(RBSN)
									SiN/SiC複合セラ
									チタン酸アルミ(AT)
2) 高比剛性部材	・露光装置ステージ (液晶・半導体製造)	<200℃	◎	◎			◎		炭化ホウ素(B ₄ C)
									SiC系複合セラ
3) 高耐性部材	・LiB正極材製造レトリ ・CALロール ・ラジアントチューブ (鉄鋼、工業炉)	>1000℃	◎						アルミナ(Al ₂ O ₃)
									窒化ケイ素(Si ₃ N ₄)
									炭化ケイ素(SiC)

表3-1 に示すように使用する材質は出口製品や使用条件により多岐にわたり、従って要求される性能も異なる。本事業において個々の材料を対象として課題解決に取り組み、所定の目標を達成するとともに、開発過程で新たに自主設定した接合部の疲労特性や使用条件を考慮した腐食試験に対する耐性も確認し、概ね、課題③革新的省エネセラミックスの部材化への移行を果たすことができた。そして課題③(補助事業)において、大型部材化とその評価を実施し、当初に設定した目標値は達成することができた。以下に詳細について述べる。

3-1-1-2 個別要素技術の成果

研究開発項目① ニアネット成形・接合技術の開発

①-1 設計・造形基盤技術

高温断熱部材に求められる軽量、断熱性、強度を両立するための容器形状の設計と個々を構成する中空ユニットの最適構造に関する検討を行なった。全体形状としては、幾何学的に同一体積では最小表面積となる球体が理想的と考えた。立体幾何学より球体を分割する方法は多く知られているが、その中で、最終的なユニットのサイズ、成形のしやすさ、を考え、正準五角形を選択しさらに、熱流体解析および熱応力解析に基づき、側壁や背面に開口部を有し、内部空間に断熱層や蓄熱層を有する各種中空ユニットの設計および試作を行なった。図3-2には設計に基づくユニットと容器の形状を示す。容器はユニット60個で構成される。

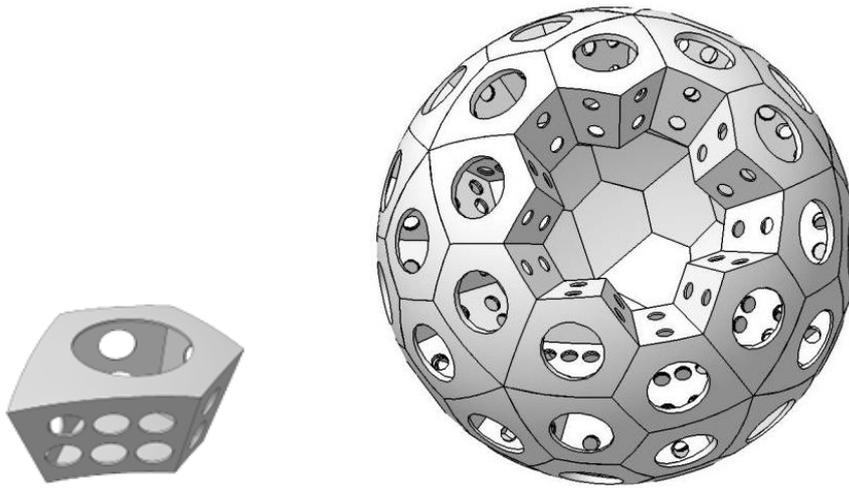


図3-2 中空ユニット、及び容器の形状

設計検討の結果を踏まえ、中空ユニットのニアネット成形と接合に取り組んだ。中空ユニットのニアネット成形に関する目標値は、材質の熱膨張や接着部の厚さを考慮し、寸法誤差 1.5%以下とした。ケイ素粉末からなる水系スラリーを用いて、石膏型を用いた鋳込み成形および窒素中における反応焼結により窒化ケイ素（RBSN）からなる中空ユニットを作製した。従来、ケイ素粉末の水和反応によるスラリー特性の低下により、鋳込み成形、特に肉厚制御は困難であった。そこで、スラリーの粒度、成分の調整によりケイ素粉末の水和抑制を行なった結果、着肉時間による肉厚制御が可能となった。作製した中空ユニットについて面単位で寸法測定を行なった結果、寸法誤差は 1%以下であった。また、局所的な焼結変形挙動を把握した。このように、鋳込み製法における変形挙動を三次元的に把握し、設計に反映することにより、高精度な焼結体を得る手法を確立した。同手法により作製した Al_2TiO_5 （収縮率 6%）からなる中空ユニットの寸法誤差は 1.5%以下であり、目標を達成した。得られた中空ユニットを、無機接着材を用いて組み立てることにより直径 240mm の球状の容器部材を作製した（図3-3）。接着部を模したテストピースを用いてアルミ溶湯浸漬試験を行なった結果、初期使用における溶湯シール性が確認された。



図3-3 中空ユニット、及びアセンブリの外観（RBSN 製、1/4 スケールモデル）

また、高温断熱部材以外の用途、例えば半導体製造装置用高比剛性部材を想定し、高比剛性材料 炭化ケイ素の接合技術開発を行っている。高比剛性部材を接合で実現するにあたり、接合部分が高比剛性部材の剛性つまり変形にどの程度寄与するか構造解析シミュレーターで解析を行った。その結果、接合部はほとんど影響せず一体型部材と同等レベルの変形であることが分かった。これにより、性能劣化（剛性劣化）のデメリットなく、接合の利点である①製造工程の省エネ化、②低コスト化、および③構造自由度向上を享受できることが分かった。

①-2 接合技術

1) 各材質の接合における基礎試験結果について

1-1) B₄C セラミックスの接合

炭化ホウ素 (B₄C) セラミックスは、高硬度、高弾性率、低密度という優れた特性を有しているが、難焼結・難加工という欠点のため、大型・複雑形状の B₄C セラミックスを一体物で作製するためには、製造コストの増大が懸念される。そこで、本プロジェクトでは B₄C の低温接合技術開発を実施した。その結果、卑金属(アルミニウム)を接合材として用いることによって、700°C程度の低温でも母材相当の高い接合強度が得られた。接合部の微構造観察より、ナノレベルの亀裂先端まで接合材は浸透し、強固な結合を形成し、緻密な組織を呈していた。また、TEM 観察より、接合材であるアルミニウム側には転位や歪みが観察され、接合を阻害する要因である残留応力を接合材が緩和している現象が見られた。更に、B₄C 接合体を室温から 200°C まで 1000 回繰返した熱疲労特性を測定したところ、試験片(5 本)全てが母材から破断し、接合部の強度の劣化は観察されなかった。また、20-200MPa の応力を周波数 5Hz、36 万回繰返した機械疲労特性では、試験片(5 本)は全て破断しなかった。これらのことから、B₄C 接合体の熱・機械的疲労特性も良好であり、信頼性が高い接合技術であることがわかった。

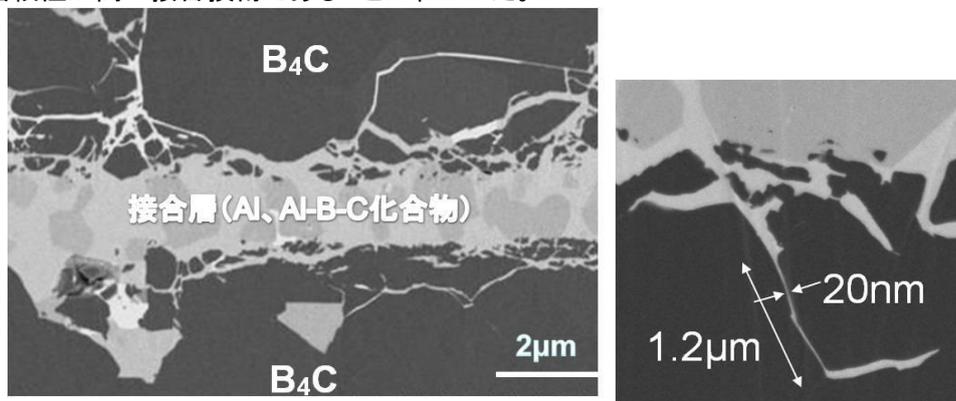


図 3-4 Al の B₄C 亀裂内への浸透性状況、それを利用した接合界面

1-2) SiC 系複合セラミックスの接合

開発した SiC 系複合材料の接合に関して、反応焼結技術を利用した接合方法で検討を開始し、炭素を接合部位に配置させることで、素材中に含まれる遊離シリコンが接合部位へ移動し、接合する現象を見出した。このシリコン移動現象を利用することで、外部からのシリコンアシストなしで接合体の作製が可能であることから、接合方向、接合厚みなどのシリコンの含浸由来の制限を排除することができ、余剰シリコン除去の後加工が不要になり、大型接合技術に適した方法であると判断し、開発を進めてきた。本接合に関して、接合厚みと強度の関係を調査した結果、接合厚み 15 μm 未満とすることで接合強度 200MPa (接合面積 12mm²) を達成する技術であることを見出した。接合加熱 (1400°C) における被接合素材の変化を調査した結果、開発素材は加熱前後で強度変化はないという結果が得られた。一方一般的な反応焼結 SiC 素材では、加熱前後で 3/5 程度の強度劣化が発生した。一般的な Si-SiC は比較的大きな欠陥の形成が見られるのに対し、開発素材は加熱後、大きな欠陥、空孔を形成しない様子を確認した。スケールアップ化に対する対応と安定化を図るため、接合材の厚さ、カーボン源種、炭素粒径等の強度への影響を調査した。加工業者へのヒアリングより、メートルサイズでは 15 μm 以上の加工誤差が発生することが明らかとなり、これまで検討してきた接合厚みでは大型化の対応は困難と判断し、50~100 μm 程度で高強度を発現する接合を見出す検討をした。SiC 粒子を複合化した接合材を利用することで接合厚み 126 μm、接合強度 204.6MPa (接合面積 12mm²) が得られ、接合厚みの増加と高強度化を達成できる可能性が示された。この接合材を用いて 200mm 程度のサイズのモデル部材の試作を実施したところ、接合材をシート状とすることでハンドリング性が良く、組み合わせが容易となることで、接合加熱後に隙間のない接合体の作製が可能であることが明らかとなった。実用化に向けて、接合面積・形状、接合個数、位置決め方法等の最適化が必要であるが、本方法が大型部材の接合方法に有効であることが示唆された。

高比剛性を有する Si-SiC-B₄C 系セラミックス (開発部材) 同士の接合の基本プロセスとしては、

i) セラミックス同士をカーボンシートを介して接触させてから加熱し、ii) 高温において、接触界面に染み出た Si 融液とカーボンとを反応させて SiC を in-situ 形成して接合させる。従来部材 (Si-SiC 系セラミックス) 同士を上記方法で接合した場合は、接合界面近傍において Si 融液の染み出しに伴い形成した空隙の合体・成長が進行し、その結果として、この空隙が破壊起点となり接合体の著しい強度低下をもたらすことが知られている。一方、開発部材からなる接合体の場合は、空隙が粗大化し難いため、接合体の強度は開発目標値 (200MPa 以上) を達成した。本項では、開発部材の接合界面近傍の微細組織が従来部材と大きく異なる原因を明らかにするために、接合界面の組織形成に及ぼす Si 融液中に固溶する元素の効果について、原子・ナノレベルの観点から解析した。

骨材の 6H-SiC とカーボン粒子の間に Si 融液が存在する場合、カーボンの一部が Si 融液中に溶解・拡散し、Si/6H-SiC 界面において 3C-SiC として析出することが知られている。そこで、カーボン容器内に、6H-SiC 単結晶基板上に Si ウェハあるいは B 添加 Si ウェハ (厚さ 1mm) を設置した後、1500°C・1h で Si を溶融させてモデル接合体を作製した。接合体界面を透過型電子顕微鏡にて観察した結果、無添加 Si の場合は、従来報告と同様に 6H-SiC 基板上に 3C-SiC 層が一様に形成していた。この場合のカーボン源は、容器から揮発したカーボンである。一方、B 添加 Si の場合は、6H-SiC 基板上に Si が直接接合した領域と 3C-SiC 粒子が形成した領域が混在しており、B 添加により明らかに 3C-SiC の形成が抑制されることが確認された。B が Si 融液中の物質移動を抑制したために、3C-SiC の形成が抑制されたものと推察された。そこで、3C-SiC 結晶で挟まれた非晶質 Si 中の物質移動に及ぼす B 添加効果について、分子動力学計算により解析した。その結果、非晶質 Si 中に B を添加することで、非晶質 Si 中の Si の移動が大きく抑制されることがわかった。したがって、実在の Si-SiC-B₄C 系の方が Si-SiC 系よりも内部の空隙が小さいのは、Si 融液中の B により Si の外方向への移動が抑制されたため、その結果として、空隙の合体・成長も抑えられたからであると推察される。また、Si/6H-SiC モデル接合体において、Si 中に B を添加すると 3C-SiC の生成が抑制されたことから、接合界面における Si の再配列 (SiC の析出過程) も抑制された可能性がある。

1-3) Al₂O₃ セラミックスの接合

Al₂O₃ セラミックスに関して、主にアルミ金属の溶融を利用した接合方法や、固相拡散を用いる接合方法、更に、数種類の酸化物セラミックス原料を混合した液相焼結を用いる接合方法を検討した。具体的には、アルミ金属の酸化から生成する反応焼結アルミナ (RBAO) を主成分として、これによる高活性状態から生じる固相拡散と、ここに数種類の金属酸化物原料を焼結助剤として添加した液相焼結の、2つの駆動力を併用した接合方法を検討した。まず、接合面積 30×20mm² の小型ブロックによる予察試験から実施し、その後、φ28mm や φ90mm の小径管状部材でのサンプル試作及び評価を経て、大径管状部材でのサンプル試作へと移行していった。反応焼結アルミナを主成分とする酸化物セラミックスを接合材料として用いることで、ホットプレス等の特殊設備を用いない低加圧 (0.05MPa 以下) 条件下での 1500°C 以上の焼成プロセスを経る接合条件を確立することができた。また、導入した大気雰囲気局所加熱接合装置を用いて、φ160mm×1000mm 長さの大径アルミナパイプ2本を接合し、長さ2000mmの大型管状接合部材を作製した。部材全体の長さは2000mmと大きいですが、実際に加熱するのは接合部を中心とする 800mm の部分のみであり、投入エネルギーの小さい省エネプロセス条件を確立することができた。

高純度化が求められる生産用途用の大型セラミックス構造部材を接合法により作製するために、不純物となる焼結助剤を一切使用せずに、高純度なアルミナスラリーを接合中間層に用いて緻密質アルミナを接合する手法を開発した。従来の接合では、接合層をできる限り緻密にすることが高い接合強度を発現するために必要であるとされてきたが、本研究では、図3-5に示すように接合中間層が粗大気孔を有する多孔質であっても、適切な微細組織制御により強度劣化を招く鋭いき裂状粗大欠陥を排除することで、280MPa の高い接合強度を実現できることを明らかにした。さらに、ガラスなどを用いた酸化物溶剤法では得ることが一般に困難である 1200°C における高温強度についても、中間接合層が高純度アルミナであることから、160MPa と高い強度を示した。

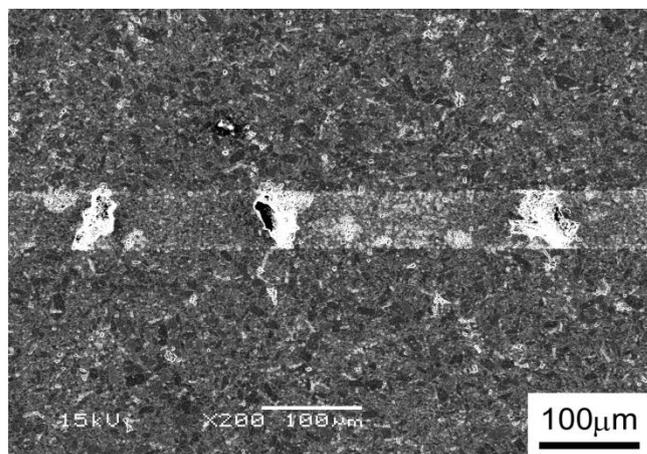


図3-5. 粗大気孔と多孔質領域と緻密質領域からなる多孔質な接合中間層の断面の電子顕微鏡（SEM）写真

この接合体の作製手法は、相対密度が99%以上の市販高純度アルミナ焼結体を被接合材として、その間に、アルミナ含有量が74.5 wt%のアルミナスラリーを挟み込み、厚みが40~100 µmとなるようにして一晚乾燥させ、この仮接合体を大気中、1650°Cで2時間焼成するという、ごくシンプルな方法である。焼成中に加圧を一切必要としないことから、特殊な加圧装置が不要で大型部材への適用も容易であるという利点を有している。また、接合中間層の厚みが、40 µm~400 µmに変化しても、安定して250MPa以上の曲げ強度を維持しており、接合厚みの変動に対する許容量が大きいことも特徴である。これらが大型部材の接合体作製を低コストかつ容易にすることは明らかであり、実用化が大いに期待される。

また得られた技術を使って接合試験片を作製し、実際の使用環境相当の腐食試験で長時間の耐久試験を進めているところである。

1-4) Si₃N₄セラミックスの接合

窒化ケイ素の管状部材は各種製造分野で幅広いニーズがあるが、いずれも高温、腐食等の環境下で使用され、また粉・流体に対するシール性が要求され、さらに最長で10mを超える長尺であることなど、製造上のハードルが高いのが現状である。これらの課題に対して、接合部において被接合材と同等の組成や組織からなる接合層を形成し（セミシームレス接合）、かつ接合部近傍のみの局所加熱で接合する（局所加熱接合）ことをコンセプトして大型管状部材の開発を行った。これまで、まず局所加熱型の新規な接合炉を開発した。この接合炉は、接合する管状部材の片側をチャックし、接合部を抵抗加熱炉に挿入して加熱することで管状部材同士を接合するものである。管状部材の接合部を加圧することが可能であり、また加熱接合時における管状部材の回転機構を有している。この局所加熱接合炉を用いて、外径φ28×内径φ18×長さ1000mmの窒化ケイ素管状部材を3本接合することで、接合面に隙間やクラックが無い、全長3000mmの窒化ケイ素長尺管状接合部材の試作に成功した。この窒化ケイ素長尺管状接合部材の室温での接合強度は、長尺管状接合部材から切り出した4mm×3mm×40mm試験片において被接合材相当の677MPaを達成した。高温での接合強度は、強度試験温度800°Cにおいて540MPaの高い値を示した。また、断面積2500mm²の窒化ケイ素角状部材を用いて、接合強度が622MPaの接合部材を開発した。

以上、局所加熱接合の開発と材料・プロセス技術を融合した省エネ型接合技術によって、窒化ケイ素長尺管状部材のセミシームレス接合に目処がたった。現在、上記技術で得た接合体の耐久性評価試験を進めているところである。

またアプリケーションとして熱交換器用途を想定し炭化ケイ素の高耐性接合技術開発も行っている。モチーフとして考えている製品形状は長尺チューブ形状であり、それを省エネルギーかつ低コスト技術である局所加熱で実現する。中間目標は接合技術確立であり目標接合強度200MPaを全体加熱により達成した。現在、その高強度化と強度のバラつき低減、および局所加熱による接合を行っている。今後、局所加熱による長尺チューブを作製しその耐久試験まで行う。

2) 短時間局所加熱型接合技術

2-1) アークを利用した接合技術

炭化物セラミックスを母相として、局所加熱による短時間接合を試みた。ケイ素と炭素との反応焼結を利用した炭化ケイ素セラミックス同士の接合では、界面でのケイ素と炭素の反応によって、接合部の厚さが数ミクロンの接合体を得ることができた。本接合手法の接合部は炭化ケイ素とケイ素によって構成されており、炭素は確認されなかった。また、本接合技術は、加熱に必要な時間が10分と短時間ながら、接合部の平均4点曲げ強度は196MPaと比較的高い接合強度が得られることが確認された。さらに、炭化ホウ素セラミックスの短時間局所加熱接合では、雰囲気制御を必要とせず局所加熱接合可能な技術を開発した。

2-2) 燃焼合成を利用した接合技術

短時間での大きな発熱とミクロ領域での液相の発生を特徴とする燃焼合成法を応用し、環境負荷の少ない高度接合技術の達成と大面積かつ複雑形状体の均一接合技術の確立を目指す。本研究実施細目は、(1)反応系組成の調整、(2)予加熱と反応温度及び伝播速度と転換率の関係把握、(3)生成物密度(気孔率)の制御、(4)液相や気相の移動と空隙率(隙間隔・形状)の関係把握、(5)生成物の膨張・収縮による特徴的な残留応力と歪みの応用、(6)曲率の変化に伴う物質・熱移動の状態把握の6項目である。

燃焼合成技術を高精密な接合技術の一つと位置付ける上で重要な「反応伝播過程の制御」の確立は、実施細目(1)及び(2)の取り組みにおいて、原料粉末の新しい混合法と新しい接合助剤の添加を駆使し達成した。燃焼合成の反応伝播過程には、(1)一端着火で反応伝播を誘導する局所加熱反応伝播モードと、(2)電気炉等で全体的に加熱して全体的な発熱反応を誘導する全体加熱反応誘導モードがある。それぞれのモードに、基材をSiC及びアルミナ系酸化物として反応伝播過程の設計と反応系の的確な選択の下でコーティングあるいは接合を指向した実験を実施した。さらに、基材との共存性を議論するために、実施細目(3)-(5)に主たる焦点を当て、熱衝撃性や熱伝導性、熱膨張性などを検討するとともに、界面近傍の微細構造を精査した。

優先伝播モードでは、他の外部エネルギーを加える必要がなく短時間で完了するが、接合面の温度の均一性が保証できない。一方、全体反応モードでは、全体が着火温度まで加熱されるので温度分布の均一性は確保できるが、所望の着火温度までの時間と消費エネルギーのロスが大きい。燃焼合成適用におけるこれらの問題点を系統的に調べ、コーティング面及び接合面の性状を詳細に調べ、接合機構とコーティング機構を明確にして最適条件を抽出した結果、Al粒子径が40 μm 以下のTiO₂-Al系にガラス質成分(Al₂O₃-(B₂O₃, SiO₂)系)を添加し、全体加熱反応誘導モードで昇温速度10度/分で燃焼合成を実施することにより、850 $^{\circ}\text{C}$ 以下での反応誘導温度で約200 μm の接合層を有する均一接合を達成することができた。独自の原料粉末混合、反応助剤添加、反応誘導システムにより、本研究で対象とする接合部材を炭化物系のみならず酸化物系にまで拡張することができ、さらに実施細目(6)において接合面の事前加工による均一反応性及び結合性の向上を達成することで、「断面積が2500mm²の試料を用い、接合強度が150MPa以上の接合部材を開発する」とした最終目標に到達できた。

2-3) レーザーを利用した接合技術

セラミックスの中でも炭化ケイ素を凌ぐ高い比剛性を示す炭化ホウ素(B₄C)は超高温耐性(融点2400 $^{\circ}\text{C}$)でもあり、優れた特長を持つ。それ故、焼結や熔融接着が難しく、製造はホットプレスなどエネルギーを大量に消費する加圧焼結法が用いられるため高コストとなり実用化を妨げている。優れた材料である炭化ホウ素を広範囲に適用するためには省エネ性の高い焼結法や接合技術の開発が必要である。本研究ではレーザーの局所加熱性能を用いてB₄Cの接合部分のみを必要な温度に加熱することにより接着を可能とし、かつ省エネ性も確保することを目的とする。

厚さを変えたB₄Cサンプルをアルミニウムを接合剤として、熱破壊を起こさず接合が可能となるレーザー照射条件(照射パワーと照射時間)を実験的に検討した結果、B₄Cは赤外線領域の光を十分に吸収し、接合に必要なエネルギー注入と温度制御が可能であり、レーザーによりアルミニウムを接合助剤としたB₄Cの接合の可能性を見出すことができた。

3) 非破壊検査技術

接合部を起点とする破壊に影響を及ぼす欠陥の探傷手法を明らかにするには、性状の明らかな人工欠陥を導入した比較試料を作製し、基準となる超音波探傷データを取得することが最も重要であ

る。試料の作製において、セラミックス部材の接合では一般に接合材を使用するため部材と材質が異なると音響インピーダンスに差が生じ、超音波が一部反射して内部欠陥の探傷に影響を及ぼす。これまでセラミックス部材の接合では、音響インピーダンスの差が超音波探傷に及ぼす影響は明らかになっていない。そこで、部材と接合材との音響インピーダンスの差が超音波探傷に及ぼす影響を検討した。部材の形状は実使用を考慮して管状とした。超音波探傷法は、超音波の入射と受信方法、解析する波の種類によって様々な手法が提案されており、従来法である水浸線形超音波法では難しいとされる密着亀裂の探傷や、水浸しないことによる検査時間の短縮化が期待されている。本プロジェクトでは線形超音波法以外に、入射周波数の整数倍周波数を持つ高調波を利用した非線形超音波法と、水浸をしないレーザー超音波可視化法も適用した。

現状の超音波探傷能力を把握するため、ポイド状人工欠陥が埋没している窒化ケイ素製板状試験片を使用し、各超音波探傷法で探傷できる最小欠陥サイズを求めたところ、線形超音波法と非線形超音波法では、 $40\mu\text{m}$ 以上の欠陥を、レーザー超音波可視化法では $90\mu\text{m}$ 以上の欠陥を検出できることが明らかになった。さらに、接合材が超音波探傷に及ぼす影響を検討するため、比較対象試料として人工欠陥を導入した後に接合材無しの拡散接合を行った管状試験体を作製した。レーザー超音波可視化法で実際の製品検査と同様に外周面を探傷したところ、欠陥起源の反射波が可視化され、それ以外の反射波は認められなかった。接合体断面を非線形超音波法で垂直探傷したところ、欠陥形状が明瞭な画像が得られた。いずれの方法でも導入した欠陥以外に欠陥は認められなかったことから、導入欠陥以外に欠陥の無い比較試料をまず接合材無しで作製できることが明らかになった。

研究開発項目② ユニットの高性能化技術

②-1 難濡れ、耐酸化耐食性向上

②-1-1：アルミ溶湯用

ユニット基板候補材に Si_3N_4 結合 SiC セラミックス(SINSIC)を用いて、Al合金溶湯中の安定性を評価するとともに、腐食・濡れ機構を解析した。その結果、SINSICを構成する SiC は合金溶湯中のSi濃度が高い場合には安定であり溶湯と反応しないが、 Si_3N_4 はSi濃度に依存せず反応することを熱力学的に明らかにした。したがって、SINSICの場合は、 Si_3N_4 領域において優先的に反応し、その結果として、溶湯に対して濡れやすくなるものと考えられた。次に、SINSIC基材への多層コーティングにより、SINSICにAl合金溶湯に対する耐食性と難濡れ性を付与する技術を開発した。このコーティングは、SINSIC基材/結合層/拡散防止層/難濡れ層からなり、i) 最表面の難濡れ層には、Al合金溶湯中で熱力学的平衡相の一つとして存在する MgAl_2O_4 を選定した。ii) また、この層を介した物質移動を抑制するために、その下層に拡散防止層として $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を配置した。iii) さらに、 Al_2O_3 /SINSIC間の密着性を向上させるため、結合層として非晶質 SiO_2 を配置した。なお、 Al_2O_3 / SiO_2 からなる中間層を付与するにあたり、 Al_2O_3 前駆体溶液への遷移金属成分の添加により高温安定相($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)への相転移を低温で促進させるとともに、高酸素分圧下におけるSINSICの予備酸化処理(成形助剤成分の表面濃化抑制)により SiO_2 の結晶化を抑制した。この様に、 Al_2O_3 と SiO_2 の相転移を同時制御することで、コーティング層全体の基板に対する密着性を向上させた。

多層コーティング材についてAl合金溶湯浸漬試験を実施した結果、Al合金溶湯中に100時間浸漬しても、コーティング層の破壊を伴うことなくコーティング最表面から合金が容易に剥離し、実質的に反応が認められないことを確認した。

②-1-2：高温鉄用

鉄とセラミックスの相互作用に関する研究を実施する。主に化学反応を考慮した無負荷条件下、および、圧縮・せん断応力条件下における鉄成分の Si_3N_4 系セラミックスへの付着メカニズムの解明を行うことを目的とした。さらに、メカニズムの解明の結果と、焼結助剤や粉体プロセスをパラメーターとした微構造制御技術に基づいて、鉄あるいはマンガン等の含有成分の付着を抑制できる Si_3N_4 系セラミックスの開発を行った。まず、 Si_3N_4 系セラミックスの構成要素である $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 、 $\beta\text{-SiAlON}$ 、およびYAGと、代表的な鉄として高張力鋼、および鉄の主要な構成要素である MnO の間の相反反応を解析した。その結果、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)と $\beta\text{-SiAlON}$ が鉄鋼含有成分に対する化学的耐性が高いことが明らかとなった。そこで、YAG/ $\beta\text{-SiAlON}$ 複合体を作製し、その機械的特性を評価した。 $\beta\text{-SiAlON}$ の組成式 $\text{Si}_{6-z}\text{Al}_z\text{O}_z\text{N}_{8-z}$ における $z=2, 3$ でガス圧焼結温度が 1800°C でYAG量が50wt%の試料を除く全ての試料で緻密な焼結体を得られた。これは、 1800°C がYAGの融点以上であること、及び、大量の液相が存在していたことに起因している。ガス圧焼結後にはほとんどの試料でYAGが生成していなかったが、 1600°C でのアニールによりYAGの生成が確認された。ま

た、アニール後の破壊靱性は YAG 量の増加と共に減少した。これらのセラミックスを用い、高張力鋼板と接触下での高温反応実験を行った。ただし、転がり摺動は圧縮とすべり成分で構成されることから、高温下での圧縮およびせん断応力条件下での実験を対象とした。実験に用いた YAG/ β -SiAlON 複合体は、YAG 量が 5 および 50wt% とし、 β -SiAlON には Si_5AlON_7 とした。これを 900°C にて圧縮応力場およびせん断応力場での接触試験を行った。特に、YAG 量が 5wt% の YAG/ β -SiAlON 複合体の摩耗率は $4.2 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/\text{N}$ と極めて低い値を示すことも見いだされた。SEM 観察および XRD による構成相の同定の結果、いずれの接触面において特に反応相は確認されなかった。

②-2 高温熱反射

異相界面における輻射熱エネルギーの反射により、部材に高い熱反射率を発現させる方法を検討した。候補材料には、i) Al 合金溶湯に対して優れた難濡れ性を有すること、ii) 屈折率差が大きく異なる物質の組み合わせであること、iii) これらの物質が高温において反応せず光学的に安定な異相界面を維持すること、が要求される。上記条件を満たす材料として、低屈折率材料に MgAl_2O_4 を、高屈折率材料に複合酸化物 A を選定した。 MgAl_2O_4 と複合酸化物 A の組合せからなる粒子分散型複合材料について、全反射率の波長依存性を評価した結果、複合材料の全反射率は、700°C の輻射熱エネルギーが最大となる波長 $3\mu\text{m}$ において 80% であることを確認した。

研究開発項目③ 革新的省エネセラミックスの部材化技術開発

③-a) 高耐性部材

250mmL x ϕ 58mm の窒化珪素管での接合試作を実施した所、接合面に剥離及びクラックは生じないと共に 900°C のサイクルテストでも十分接合強度を有する事も確認された。

③-b) 高温断熱部材

ステレオフィブリックにより、 ϕ 250 mm の円筒容器を作製し、アルミ溶湯の漏れがないことを確認した。スケールアップのため ϕ 600mm の容器を作製し、従来相当容器に比べて重量：35%減、保温性：30%向上を確認した。また大型化に伴い、出湯口部付近湯漏れが若干認められた。

また、熱通過率を断熱性の指標とし、中空ユニットの評価を行なった結果、開発した高機能中空ユニット (RBSN) は従来キャストブルに比べ、熱通過率が 40%、重量が 65%低減した。容器の球状化による放熱面積および部材体積の低減効果を考慮すると、容器部材の放熱量が 51%、重量が 71%低減する可能性を見出した。高機能中空ユニットで構成された直径 240mm の球状の容器部材 (RBSN) は、同等の容積をもつ従来キャストブルで構成された円筒状の容器部材に比べ、断熱材および鉄皮を取り付けた場合の重量が 62%低減した。容器の鉄皮表面における熱流束を指標とし、容器の断熱性を評価した結果、開発した球状容器は従来容器に比べ熱流束が 47%低減した。容器の球状化による放熱面積の低減効果を考慮すると、容器の放熱量が 57%低減する可能性を見出した。このように、セラミックスからなる小型の高機能中空ユニットを接着し、立体的に組み立てることにより直径 240mm の球状部材の作製および評価を行ない、開発した球状の容器部材は同等の容積をもつ従来部材に比べて、断熱性が 2 倍、空状態とした部材単体の重量が 1/2 以下となることを明らかにした。

③-c) 高比剛性部材

開発素材 (SiC 系複合材) の鑄込み成形性の改良により 400mm 型リブ構造部材のニアネット成形体を試作した。さらに、接合部材の応力変形シミュレーション解析により、1000N の一定加重負荷での撓み量は、アルミナ 1.42 μm 対して SiC 開発素材 0.87 μm = 撓み量 61% となり 70% 以下を達成できることを確認した。また集中研で得た成果を使って B_4C による 200口程度の複雑形状モデル部材の試作を行った。

3-1-2 特許出願状況等

表3-2. 特許・論文等件数

研究開発項目	論文数	論文の被引用度数	特許等件数(出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
ニアネット成形・接合技術の開発							
ユニットの高機能化技術							
革新的省エネセラミックスの部材化技術開発							
計	17		18				

注: 特許権の実施件数、ライセンス件数、国際標準への寄与件数は、プロジェクトが発足して日が浅いため、上記の実績に留まっている。

論文に関しては、平成23年度に入って、基礎研究の見通しがついたことにより、積極的に投稿を実施することとなった。

また、特許に関しては、平成23年度は知財プロデューサーが集中研に常駐していること、週毎の研究員との会議にも出席していることにより、特許の発掘、研究員からの特許の提案が増えつつある。

表3-3 研究発表リスト

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
平成21年12月	Proceedings of The 11th International Symposium on Eco-materials Processing and Design	Materials Process Design on the Basis of Exergy Analysis	北、日向、長岡、近藤
平成22年1月	JFCCニュースNo.97	新規国プロジェクト紹介「革新的省エネセラミックス製造技術開発」	-
平成22年1月	11th International Symposium on Eco-materials Processing and Design	Materials Process design on the basis of Exergy Analysis	(産総研)北英紀、日向秀樹、近藤直樹
平成22年1月	The 34th International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites	Joining of Silicon Nitride with Glass or Powder under Mechanical Pressure	(産総研)近藤直樹、日向秀樹、長岡孝明、北英紀
平成22年3月	日本セラミックス協会2010年年会	Al合金溶湯中におけるSi ₃ N ₄ 結合SiCセラミックスの腐食機構	(JFCC)和田匡史、柏木一美、横江大作、北岡諭
平成22年3月	日本セラミックス協会2010年年会	炭化ケイ素セラミックスのマイクロ波発熱特性	(SFRA)関根圭人、(産総研)日向秀樹、平尾喜代司、北英紀

平成22年3月	日本セラミックス協会2010年年会	ガラスや窒化ケイ素粉末を用いた窒化ケイ素の接合	(産総研)近藤直樹、日向秀樹、長岡孝明、北英紀
平成22年3月	日本セラミックス協会2010年年会	窒化ケイ素接合体のX線CT法による非破壊検査	(産総研)近藤直樹、西村良弘、鈴木隆之、北英紀
平成22年3月	日本セラミックス協会2010年年会	Reaction joining of SiC ceramics by using TiB ₂ -based composites	(産総研)田無辺、北英紀、日向秀樹、近藤直樹、長岡孝明
平成22年6月4日	3rd International Symposium on SiAlONs and Non-Oxides (招待講演)	Exergy Consumption Analysis on Production and Usage Process of Silicon Nitride	北、日向、長岡、近藤
平成22年6月	2010年産総研中部センター研究発表会(ポスター)	セラミックスの大型部材化プロセス (ポスター)	北、日向、近藤、長岡、堀田、北憲一郎
平成22年6月	2010年産総研中部センター研究発表会(ポスター)	窒化ケイ素の接合に関する基礎検討 (ポスター)	近藤 直樹,日向 秀樹,北英紀,平尾 喜代司
平成22年6月	2010年産総研中部センター研究発表会(口頭)	窒化ケイ素の接合に関する基礎検討 (口頭)	北、日向、近藤、長岡、堀田、北憲一郎
平成22年7月	日本保全学会(ポスター)	セラミックス材料の非破壊評価	西村、近藤、北、鈴木
平成22年7月	日本保全学会 第7回学術講演会	セラミックス材料の非破壊評価	西村他
平成22年7月	第26回日本セラミックス協会関東支部研究発表会	Si ₃ N ₄ およびYAG とMnO およびFe の高温相反応	(横浜国大院)伊藤彰浩、多々見純一、脇原徹、米屋勝利、目黒竹司
平成22年8月	PRICM7	Environmental Impact Evaluation and Rationalization of Ceramics Process on the Basis of Exergy Analysis	北、日向、近藤、長岡
平成22年11月	平成22年度産総研本格研究ワークショップ	製造装置・システム用大型セラミックス部材の開発	北 英紀

平成22年11月	ICC3サテライト会議(第1回セラミックスエンジニアリングワークショップ)	窒化ケイ素長尺管状部材の接合技術開発	堀田 幹則,近藤 直樹,日向 秀樹,北 英紀
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Microwave Local Heating of Silicon Nitride for Joining	近藤 直樹,日向 秀樹,北 英紀,平尾 喜代司
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Stereo Fabric Modeling Technology in Manufacturing of Ceramics	北 英紀,日向 秀樹,長岡 孝明,近藤 直樹
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Development of Joining Technique of Alumina Ceramics Using Reaction Bonding Aluminum Oxide Materials	井筒靖久、他
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Joining of Silicon Carbide Ceramics by Using Tape Cast Interlayer	田 無辺、他
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Joining of SiC Based Ceramics by a Reaction Sintering Technique	T. Ide, H. Hyuga, H. Kita
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Low Temperature Joining Process for Carbide Ceramics	K. Sekine, T. Kumazawa, H. Hyuga, H. Kita
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Development of Insulated and Lightened Furnace Equipments for Molten Aluminum by Stereo Fabric Modelling Technology	I. Himoto, T. Nagaoka, H. Kita
平成22年11月	The 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)	Stereo Fabric Modeling Technology for Semiconductor Production Equipment	N. Shino
平成23年1月	The 35th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites	Joining of Silicon Nitride Long Pipe by Local Heating	堀田 幹則,近藤 直樹,日向 秀樹,北 英紀
平成23年1月	The 35th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites	Ceramic Joining by Microwave Local Heating	近藤 直樹,日向 秀樹,堀田 幹則,北 英紀,平尾 喜代司

平成23年2月	ミニマル研究会講演	大型・超精密・複雑形状を小さなモノでつくるミニマルマニュファクチャリングと製造効率の指標化	北 英紀
平成23年2月	日本セラミックス協会東海支部講演	製造装置用高度セラミック部材の開発及びその資源消費に対する有効性の評価－エクセルギー概念の適用－	北 英紀
平成23年2月	nanotech2011、NEDOブース発表	半導体製造装置用途のセラミックス部材の開発	安藤正美、熊澤猛
平成23年2月	nanotech2011、NEDOブース発表	高温断熱容器用途のセラミックス部材の開発	樋本伊織
平成23年3月	日本セラミック協会年会	局所ヒーター加熱による窒化ケイ素長尺パイプ接合体の作製	堀田 幹則、他
平成23年3月	日本セラミック協会年会	エクセルギー概念の部材開発への適用(事例研究:熱輸送用大型容器の開発)	北 英紀、他
平成23年3月	日本セラミック協会年会	多孔質な接合中間層を有する高純度・高強度アルミナ接合体の開発	宮崎 広行、他
平成23年3月	日本セラミック協会年会	炭化ホウ素セラミックスの低温接合	関根圭人、熊澤猛、日向秀樹、北英紀
平成23年3月	日本セラミック協会年会	炭化ホウ素-酸化物セラミックスの低温接合	牧裕司、田中洋介、熊澤猛、関根圭人、日向秀樹、北英紀
平成23年3月	日本セラミック協会年会	Reaction-infiltrated TiB ₂ -SiC-Si composites	Wubian Tian・Hideki Kita・Hideki Hyuga・Naoki Kondo
平成23年3月	日本セラミック協会年会	Si ₃ N ₄ 結合SiCセラミックスの酸化に及ぼす酸素分圧の影響	和田匡史、柏木一美、北岡諭、樋本伊織、木下寿治
平成23年3月	日本金属学会2011年春期大会	局所加熱接合による窒化ケイ素長尺管状部材の開発	堀田 幹則、他

平成 23 年 3 月	日本機械学会 北信越支部第 48 期講演会	開口合成法による内部欠陥の可視化シミュレーション	福田勝己、西村 良弘、他
平成 23 年 3 月	日本機械学会 関東支部第 17 期総会講演会	波動逆解析による内部欠陥の可視化システムの構築	福田勝己、西村 良弘、他
平成 23 年 4 月	溶接学会平成 23 年度春季全国大会	大型セラミックス部材の開発に向けた窒化ケイ素パイプの局所加熱接合	堀田 幹則、他
平成23年6月	2011年産総研中部センター 研究発表会・オープンラボ	ステレオファブリック造形技術～レゴブロックに似た新しいセラミックスの製造技術～	堀田幹則、長岡孝明、北英紀
平成 23 年 9 月	15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics	Study of Defect Inspection in Ceramic Materials Using UT and X-Ray Methods	西村 良弘、他
平成 23 年 9 月	15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics	Construction of System for Visualizing Internal Defects by Wave Motion Inversion Analysis	西村 良弘、他
平成23年9月	第24回秋季シンポジウム	有機ケイ素系ポリマーとアルミニウムを用いたアルミナの接合方法	北憲一郎、近藤直樹、井筒靖久、北英紀
平成23年9月	日本セラミックス協会 第24回秋季シンポジウム	局所加熱接合により作製した窒化ケイ素長尺管状部材の強度特性	(産総研)堀田幹則・近藤直樹・北英紀・(ステレオファブリック技術研究組合)井筒靖久
平成23年9月	第24回秋季シンポジウム	Joining of SiC by Al infiltrated TiC tape interlayer	Wubian Tian, Hideki Kita, Hideki Hyuga, Naoki Kondo
平成23年9月	日本セラミックス協会 秋季シンポジウム	ステレオファブリック造形による省エネルギー型熱輸送容器の開発	北英紀、樋本伊織
平成23年9月	日本セラミックス協会 第24回秋期シンポジウム	コーティングによるSi ₃ N ₄ 結合SiCのAl合金溶湯に対する耐付着性の改善	和田匡史、柏木一美、北岡諭
平成23年9月	日本セラミックス協会 第24回秋期シンポジウム	アルミナスラリーを用いたアルミナ接合体の作製とその評価	宮崎広行、堀田幹則、北英紀、井筒靖久

平成23年9月	日本セラミックス協会 第24回秋期シンポジウム	炭化ホウ素セラミックス接合体の抗折強度に及ぼす接合時間の影響	関根 圭人・熊澤 猛・日向 秀樹・北 英紀
平成23年11月	第2回構造材料国際クラスターシンポジウム	製造を支える大型・複雑形状セラミックス部材の開発	堀田幹則、北英紀
平成23年11月	中部地域公設研テクノフェア2011	金属融液、蓄熱体搬送用コンテナ	北英紀、堀田幹則、近藤直樹、樋本伊織
平成23年11月	日本金属学会 2011年秋期講演大会	窒化ケイ素のボロシリケートガラスを用いた接合	近藤 直樹

表3-4 研究論文リスト

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
平成21年9月	セラミックス	「革新的省エネセラミックス製造技術開発」開始	北 英紀
平成21年12月	Proceedings of EcoDesign2009	Evaluation of Manufacturing Process on the Basis of Exergy Analysis	北 英紀,日向 秀樹,長岡 孝明,近藤 直樹
平成22年1月	JOURNAL OF THE CERAMIC SOCIETY OF JAPAN	Joining of Silicon Nitride with silicon slurry via reaction bonding and post sintering	近藤 直樹,日向 秀樹,北 英紀
平成22年4月	素形材	アルミ溶解工程へのセラミックス応用とエクセルギー評価	北 英紀
平成22年7月	Materials Science Forum	Environmental Impact Evaluation and Rationalization of Ceramics Process on the Basis of Exergy Analysis	北 英紀,日向 秀樹,長岡 孝明,近藤 直樹
平成22年7月	日本保全学会 第七回学術講演会要旨集	セラミックス材料の非破壊評価	西村 良弘、他
平成22年9月	Journal of the Ceramic Society of Japan	Effect of composition and joining parameters on microstructure and mechanical properties of silicon carbide joints	田 無辺、他

平成22年8月	JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY	Reaction joining of SiC ceramics by using TiB2-based composites	田 無辺、他
平成22年10月	JOURNAL OF THE CERAMIC SOCIETY OF JAPAN	Joining of silicon nitride by microwave local heating	近藤 直樹,日向 秀樹,北英紀,平尾 喜代司
平成22年12月	JOURNAL OF THE CERAMIC SOCIETY OF JAPAN	Evaluation of Joined Silicon Nitride by X-Ray Computed Tomography (X-ray CT)	近藤 直樹、他
平成23年2月	JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	Synthesis, microstructure and mechanical properties of reaction-infiltrated TiB2-SiC-Si composites	田 無辺、他
平成23年2月	JSAEM STUDIES in APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS. 14	Study of Defect Inspection in Ceramic Materials Using UT and X-Ray	西村良弘
平成23年2月	JSAEM STUDIES in APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS	Construction of System for Visualizing Internal defects by Wave Motion Inversion Analysis	西村良弘
平成23年5月	Ceramics International	Joining of alumina with porous alumina interlayer	宮崎 広行、堀田 幹則、北英紀、井筒 靖久
平成23年7月	Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Vol. 20(2), 94-99(2011)	Volume Combustion Synthesis of NiAl as Applied to Ceramics Joining	W.W. Wu, A.V. Gubarevich, H. Wada, and O. Odawara
平成23年9月	Journal of the Ceramic Society of Japan	Semi-homogeneous joining of silicon nitride by using oxynitride glass insert and post heat treatment	近藤直樹、堀田幹則、日向秀樹、北英紀
平成23年10月	耐火物誌	セラミックス中空ユニットで構成されたアルミニウム溶湯搬送用断熱容器の開発 -第2報:ユニットの側壁構造に関する検討-	樋本伊織、北英紀

表3-5 出願特許リスト

出願日	出願番号	出願に関わる特許等の標題	出願人
平成22年2月16日	特願2010-031296	筒状構造体、成型型、および筒状構造体を製造する方法	(産総研)北英紀、近藤直樹、日向秀樹
平成22年6月17日	特願2010-138653	容器	(NGKアドレック)樋本伊織、木下寿治、山川治、(産総研)北英紀、近藤直樹、長岡孝明

平成22年6月24日	特願2010-143427	電磁波照射を用いた材料の接合方法及び接合装置	(産総研)平尾喜代司、近藤直樹、日向秀樹、北英紀
平成22年6月30日	特願 2010-148550	搬送用部材および搬送装置	京セラ
平成22年7月27日	特願2010-167662	セラミックス接合体の製造方法	(三井金属鉱業)井筒靖久、(産総研)北英紀、宮崎広行、近藤直樹
平成22年8月31日	特願2010-193784	炭化ホウ素含有セラミックス接合体及び該接合体の製造方法	(美濃窯業)関根圭人、熊澤猛、(産総研)北英紀、日向秀樹
平成22年9月16日	特願2010-208121	2つのセラミック製部材を相互に接合する方法、およびセラミック製部材	(産総研)近藤直樹、平尾喜代司、北英紀、日向秀樹、堀田幹則
平成22年10月8日	特願2010-228650	複数のセラミックス部材を相互に接合する方法	(産総研)北英紀、宮崎広行、堀田幹則、北憲一郎、(三井金属鉱業)井筒靖久
平成22年11月11日	特願2010-253236	炭化ホウ素含有セラミックス接合体及び該接合体の製造方法	(美濃窯業)関根圭人、熊澤猛、(産総研)北英紀、日向秀樹
平成22年11月24日	特願2010-261101	蓄熱体及び蓄熱方法	(産総研)北英紀、堀田幹則
平成23年2月18日	特願2011-032863	アルミナ接合体及びアルミナ焼結体の接合方法	(産総研)宮崎広行、北英紀、堀田幹則、(三井金属鉱業)井筒靖久
平成23年4月20日	特願2011-093881	セラミックス接合体及びその製造方法	(三井金属鉱業)、(産総研)
平成23年4月20日	特願2011-143496	積層体及びその製造方法	(ファインセラミックスセンター)
平成23年8月30日	特願2011-188018	炭化ホウ素含有セラミックス接合体及びその製造方法	美濃窯業、産総研
平成23年8月30日	PCT/JP2011/069670	炭化ホウ素含有セラミックス接合体及びその製造方法	美濃窯業、産総研
平成23年9月10日	特願2011-192800	炭化ホウ素含有セラミックス-酸化物セラミックス接合体及び該接合体の製造方法	美濃窯業、産総研
平成23年9月15日	特願2011-201514	セラミックス接合体及びその製造方法	(三井金属鉱業)、(産総研)
平成23年9月21日	特願 2011-206244	流路部材およびこれを備える熱交換器	京セラ

表3-6 プレスリリース等リスト

発表年月日	発表媒体	発表タイトル
平成22年2月15日	日刊工業新聞 26面掲載	「技術で社会を先導 産総研の R&D<15> 革新的な省エネセラミックスの製造技術」
平成22年11月12日	化学工業日報 3面掲載	「炭化ホウ素 低温接合で高抗折強度 省エネ製法開発 大型・複雑形状が可能」
平成22年11月30日	中部知財フォーラム2010 in 名古屋	特許庁長官 講演 「最近の知的財産行政の動向」

3-2 目標の達成度

表3-7. 中間目標に対する成果・達成度の一覧表

目標・指標	成果	達成度
研究開発項目① ニアネット成形・接合技術の開発		
接合部材設計技術を開発し、同設計に指定された精度、形状を得るための成形方法、及び焼成条件を確立する。	焼結収縮挙動を三次元的に把握、収縮挙動を石膏型の設計に反映、得られた焼成体を三次元的に測定し、作製したAT中空ユニットは平均値で誤差1.5%以下達成。鑄込み製法における焼結収縮挙動の把握・反映技術を確立した。	達成
部分加熱や固体反応利用などの接合機構を明らかにするとともに、断面積が12mm ² の試料を用いて接合強度200MPa以上の接合部材を開発する。	用途に応じた各種セラミックスについてほぼ母材強度相当の接合強度を得た。 ①SN:接合温度1600°Cにおいて、接合体曲げ強度677MPaの最大値を示した。 ②B ₄ C:加工傷を卑金属の超浸透現象と反応で治癒し、母材と同等の接合強度(250MPa)を実現。 ③SiC系複合材外部からのSiアシストをせず、含有する遊離Siを利用して接合する技術を検討し、412MPaの強度を得た。 ④その他材料の接合強度 SiC:215 MPa、Al ₂ O ₃ :214MPa ⑤断面積が1250mm ² の試料を用い、接合強度が200MPa以上を得た。	達成
固相反応や自己伝播する発熱反応などを用いた高強度接合を実現するため、反応剤・接合剤の厚み、組成、処理温度、自己伝播速度、断熱燃焼温度などのプロセス因子が接合強度に及ぼす影響を検討し、本プロセスによる接合構造の最適化を確立する。	・B ₄ C/Al間の固相反応、浸透機構と接合温度との関係を検討し、接合層厚みや接合温度の最適化を行った。 ・Si-SiC焼結体の接合において、含有する遊離Siを利用する技術を検討。分子動力学法によるシミュレーションより、ホウ素存在下でSiの移動が抑制される現象を確認。接合厚みの増加に伴い接合強度は減少し、炭素のみでの接合では接合厚みを15μm以下とする必要がある。温度、雰囲気についても最適条件を見出した。 ・Al ₂ O ₃ 同士を燃焼合成で接合する場合、Al粒子径が40μm以下のTiO ₂ -Al系にガラス質成分を添加し、全体加熱反応誘導モードで昇温速度10°C/分で燃焼合成を実施することにより、850°C	達成

	以下での反応誘導温度で約 200 μm の接合層を有する均一接合を達成した。	
研究開発項目② ユニットの高性能化技術		
Al 合金溶湯に対する濡れの機構を解明する。	Si ₃ N ₄ 結合 SiC セラミックス (SINSIC) において、Si ₃ N ₄ の方が SiC よりも優先的に反応する機構を熱力学的に解明し、SINSIC を適用する際の課題を明らかにした。また、Al 合金溶湯と接触する面は、少なくとも熱力学的安定相にすべきであることを確認した。	達成
Al 合金溶湯中に 100 時間浸漬した後実質的に反応が認められない素材を開発する。	多層コーティング (MgAl ₂ O ₄ /Al ₂ O ₃ /非晶質 SiO ₂ /SINSIC 基材) により、Al 合金溶湯中に 100 時間浸漬後もコーティング最表面と合金が容易に剥離し、実質的に反応が認められないことを確認した。なお、Al ₂ O ₃ /非晶質 SiO ₂ からなる中間層を付与する際に、これら物質の相転移を同時に制御することで、コーティング層全体の基板に対する密着性を向上させた。	達成
900°Cにて、鋼板相当の鉄と転がり摺動させたときに、鉄に含まれていた成分と実質的に反応しない素材を開発する。	高温相反応実験を行い、YAG と β -SiAlON が鉄に含まれている成分と反応しないことを確認した。そこで、YAG と β -SiAlON からなる複合体の作製を試みた。冷却時に 1600°C でアニールすることで YAG/ β -SiAlON 複合体の作製に成功した。これと高張力鋼板を 900°C で接触させながら焼成した結果、両者に反応相の生成は認められなかった。	達成
700°C以上の温度域の反射率が 80%以上の素材を開発する。	MgAl ₂ O ₄ と複合酸化物 A の組み合わせは、異相界面における輻射熱エネルギーの反射により、700°C の輻射熱エネルギーが最大となる波長 3 μm において全反	達成

	<p>射率が 80%であることを確認した。</p> <p>複合酸化物 A 前駆体溶液に含浸した Al₂O₃ 基多孔質シートを焼成して複合化を図ると共に、この製造工程を介してシートが SINSIC 基材に接着可能であることを確認した。</p>	
研究開発項目③ 革新的省エネセラミックスの部材化技術開発		
a) 高耐性部材		
<p>900°Cの環境下に曝した後において、接合面に剥離、クラックが生じない長さ 250mm 以上、直径 50mm 程度の管状接合部材を試作する。</p>	<p>250mmL x φ58mm の窒化珪素管での接合試作を実施した所、接合面に剥離及びクラックは生じないと共に 900°Cのサイクルテストでも十分接合強度を有する事も確認された。</p>	達成
b) 高温断熱部材		
<p>700°C以上のアルミ溶湯を内部に入れた状態で湯漏れがなく、同等の搬送容積をもつ従来部材に比べて、断熱性が 2 倍、空状態とした部材単体の重量は 1/2 以下である、直径が 250mm 程度の槽状部材を試作する。</p>	<p>φ250 mm 相当の円筒容器を作製し、アルミ溶湯の漏れがないことを確認した。また、φ250mm の球体容器を試作し、熱流束、重量とも従来容器の 1/2 以下であることを確認した。</p> <p>直径φ600mm の容器を試作した。性能は以下の通り。</p> <p>重量：35%減 保温性：30%上 湯漏れ：若干あり（出湯口部付近）</p> <p>搬送容器の製造、使用、廃棄に関してエクセルギー解析を実施し、省資源・省エネ効果において優位性を付与できる条件を明らかにした。</p>	達成
c) 高比剛性部材		
<p>長さ（奥行き）が 200mm で、従来相当の部材に比べて、撓み量が 70%以下である盤状部材を試作する。</p>	<p>高比剛性で鋳込み成形可能な反応焼結 SiC-B₄C 素材を開発し、さらに、集中研で開発した反応焼結接合を用いて 200mm の盤状接合体を試作した。開発素材の鋳込み成形性の改良により 400mm の大型リブ構造部材のニアネット成形体を試作した。さらに、接合部材の応力変形シミュレーション解析より撓み量 60%を達成できることを確認した。</p>	達成

4. 研究成果の事業化、波及効果等その他成果

4-1 事業化等成果

1) 技術成果概要

集中研で得られた接合やニアネット成形に関する成果を元に、補助事業においてモデル部材化に関わる技術開発を行い、また一部の成果についてはユーザー企業との連携を進めている。

2) 成果の利用主体(活用、事業化の想定者)の例示

本事業で得られた成果について、効率的に実用化を進めるとの方針にもとづき、ユーザーとの連携、情報交換は重視してきた。具体的には成果の早期部材化、ユーザーへの紹介と説明の実施、またサンプル提供と基本耐久性等の評価を積極的に進めてきた。また補助事業においてもユーザーメーカー各社と設計、仕様に関する情報交換を行いながら開発を実施している。

3) 事業化に至る期間

高比剛性部材、高温断熱部材、高耐性部材それぞれについて、今後実証評価、実用化顧客評価を実施し、平成 26 年度を目処に順次製品に技術導入あるいは本技術を使用した製品を販売していく予定である。

4-2 波及効果

1) 異業種の連携などを契機とした新規分野への事業展開

本事業では、製品対象(出口)を製造装置・システム用の大型セラミック部材として、セラミックスの大型化と形状自由度の拡大に必要な、省エネ型接合やニアネット成形、軽量断熱技術、ならびに実部材化に関わる研究開発を実施している。本事業で得られた成果(大型セラミック部材や接合、断熱等の技術)の適用範囲は、上記製造装置・システム用部材に限定されず汎用的である。特に、今後重要性が増すと思われる再生利用可能エネルギーシステム、具体的には太陽熱発電システムに不可欠な SiC 配管や集熱部、高反射・耐摩耗性を活かした集光部、或いは地熱発電用の耐食性が必要な大型配管類への展開が期待される。

2) 継続的な研究ネットワークの構築等による技術レベルの向上や、成果の他産業での応用

その他、軽量で剛性が高く、衝撃吸収性に優れた B₄C の接合体は保護部材、ロボットアームとしての展開を計画中であり、安定性の高い接合体の電子部品への展開についても調査を進めている。

5. 技術開発のマネジメント・体制・資金・費用対効果等

本事業では、あまりこれまで扱われることのなかった大型セラミックス部材をターゲットとして接合技術をはじめとする技術開発に取り組んできた。大型部材を実際に製造する場合、経済性等を考えると、小型セラミックを製造する場合に比べて安定した温度制御が困難であることや、接合面の平面度平滑度を粗くせざるを得ないなど、製造条件に制約も大きい。従って小さな試験片で実現した特性が得られないことになる。そこで本開発においては、単に高い強度を得ることを目的とせず、大型化プロセスにおける制約も考慮し、大型化に対応できるプロセス(低温化、局所加熱など)かどうか、また接合面表面の粗さなど悪条件でも安定した製品が得られるプロセス(ロバスト)を目指すこととした。そして早期にモデル部材試作等を実施し、スケールアップ化に潜む課題の抽出と対応に取り組んだ。

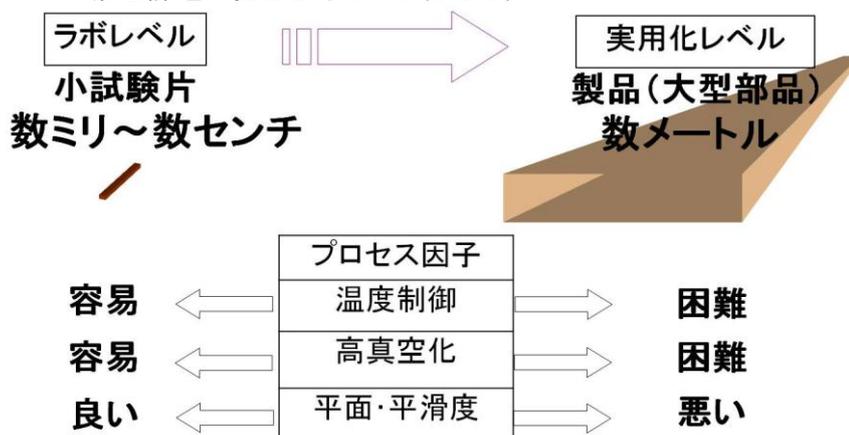


図5-1 小試験片と大型部材を対象とした場合のプロセスに関する考え方

表5-1には、本事業における課題、すなわち①ニアネット成形・接合技術の開発、②ユニットの高機能化技術の開発、③革新的省エネセラミックスの部材化技術開発の全体計画を示す。特に①②といった基盤研究の成果を、③に如何に円滑に繋げていくかが、鍵と考え、当初設定の項目に加えて、新たに「大型部材化へのブリッジング」という項目を加えて、大型部材化に向けたプロセス条件の最適化、シミュレーションあるいは実際にモデル部材を作製し、課題の抽出と対策を講じるプログラムを設けた。また表5-2には特に重要な接合に関して、年度別の取り組みを纏めた結果を示す。

表5-1 全体の開発計画

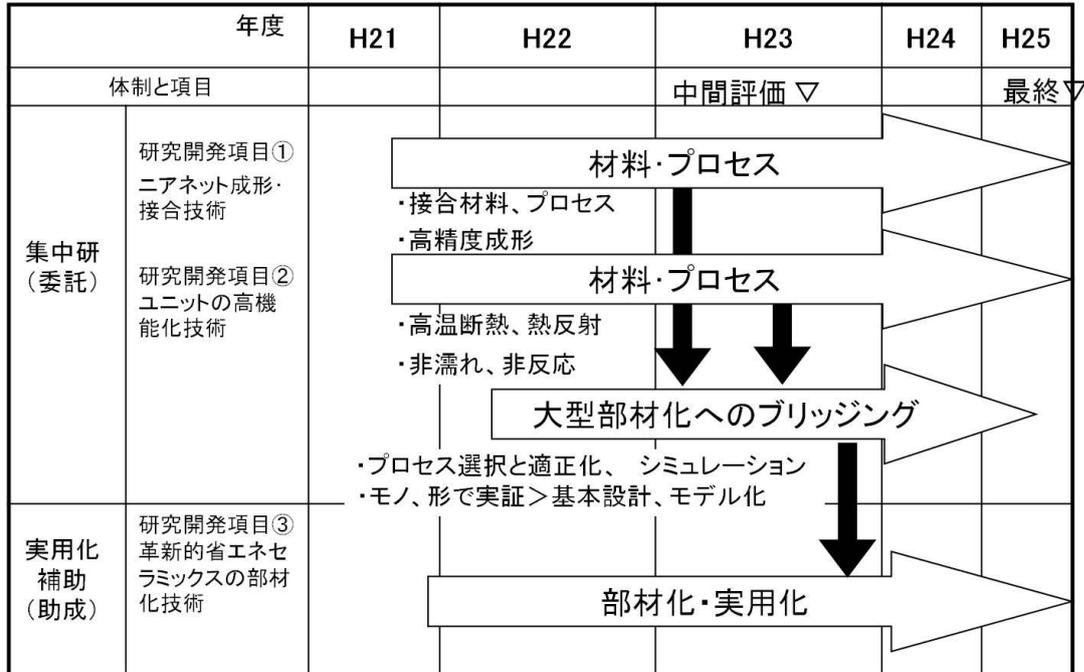
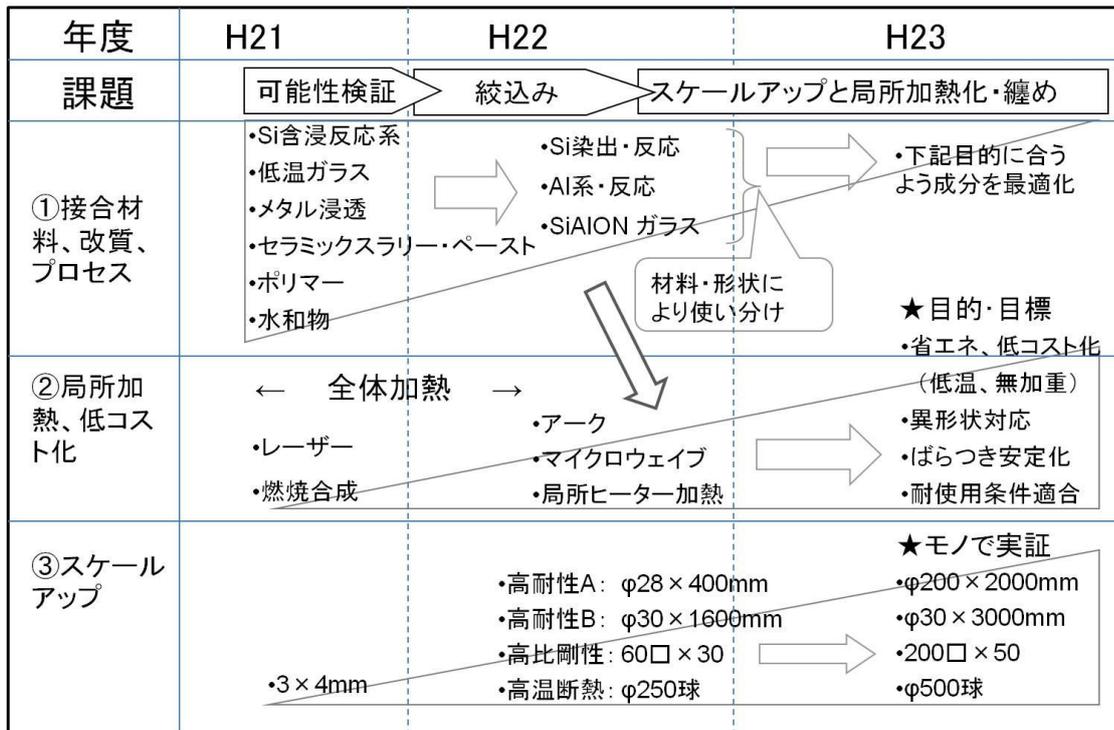


表5-2 接合技術開発における年度別取り組み



また上記の進捗を把握するため、各研究項目すべてに月単位での詳細計画を策定するとともに、進捗

管理表を設定した。進捗管理表においては、研究課題の細目、手法、評価方法、試験片形状やサイズ、評価の基準を記載した。月例会議において、状況を把握するとともに、課題が生じた場合の対応を協議し対策を決定するなど効率的に開発を進めることに努めた。

5-1 制度のスキーム

表5-3 革新的省エネセラミックス製造技術開発スキーム

項目	概要
補助対象事業	セラミックス部材の大型化、複雑形状化要求のための製造技術開発を行い、省エネでの製造技術を実施又は製品化することを目的として行う研究開発
事業内容	エネルギー対策研究開発を行う際の経費の一部補助
補助対象者	ステレオフィブリック技術研究組合、エヌジーケー・アドレック株式会社、TOTO 株式会社、三井金属鉱業株式会社、美濃窯業株式会社
補助率	委託事業:100%、補助事業:1/2以内
事業実施期間	交付決定日からその年度の年度末

5-2 制度の体制・運営

研究開発実施者の実施体制・運営は、プロジェクトリーダーの元、参画機関での推進会議及びNEDO、経済産業省、再委託先を交えた推進委員会(集中討議)を適宜開催し、事業実施での問題や課題を調整し、適切かつ妥当な運営を進めている。

実施体制に関しては、参画機関は実施テーマに関する研究開発能力を有し、柔軟な連携により開発目標を達成に向け、適切な研究開発チーム構成となっている。

全体を統括するプロジェクトリーダーが選任され、プロジェクト運営を把握し、十分に活躍できる環境が整備されている。

目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携/競争が十分に行われる体制となっている。成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取り組みを積極的に実施している。

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、ステレオファブリック技術研究組合が委託研究を、エヌジーケイ・アドレック株式会社、TOTO株式会社、三井金属鉱業株式会社、美濃窯業株式会社が補助事業を受けて実施した。また、再委託先として、東京工業大学、横浜国立大学、財団法人ファインセラミックスセンターが参加した。

また、研究開発の実施にあたっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー(北英紀 産業技術研究所 先進製造プロセス グループ長)を設置するとともに、外部有識者からの指導及びプロジェクト実施における協力のため、6名からなる採択審査委員会を設置した。

参画企業に関しては、下記の通り、研究開発、事業化を推進できる資質を備えていると考える。

表5-4 参画企業、法人の資質

組合員名	技術的能力
独立行政法人産業技術総合研究所	本研究開発の中核となる中部センターでは、セラミックスに関する優れた実績、人材、最新の研究設備及び高度な技術を有しており、多くの民間企業との共同研究を実施してきている。
エヌジーケイ・アドレック株式会社	アルミ溶湯用セラミックス部材の製造・販売実績があり、酸化物系から非酸化物系の定形耐火物、不定形耐火物の豊富な品揃えと鑄込み、プレス成形をはじめとする各種の成形技術、大型から小型の雰囲気制御ができる焼成炉を所有し、高い分析力と技術力を有している。
京セラ株式会社	幅広い産業分野にセラミックス材料を展開している中で、特に半導体・液晶製造装置用部材への展開も他社に先駆けて開始しており、現在でも世界トップクラスのシェアを有している。
TOTO 株式会社	創業以来長年に亘って衛生陶器の製造で培ってきて鑄込み成形技術をベースにして、半導体や液晶パネルの製造装置に用いられる複雑形状の大型セラミックス部材を開発し、製造、販売してきている。
財団法人ファインセラミックスセンター	アルミ溶湯に対する非濡れ材料の研究や、接合技術に不可欠な界面微構造解析、シミュレーションに関して知見、ノウハウ、機器が揃っており、またこれらの開発評価に関する高い実績を有している。

三井金属鉱業株式会社	アルミ溶湯用セラミックス部材の製造経験が豊富で、特に大型部材の製造設備、加工設備及び製造ノウハウを有している。また、金属製品の製造工程を熟知しており、部材に求められる特性が何であるか、という実際の視点で考えることができる。
美濃窯業株式会社	長年、熔融物(金属・無機物)に対する耐火物の開発・製造・販売を生業とし、蓄積された技術やノウハウを有している。また、セラミックス、粉末冶金等の製造装置(特に、焼成・熱処理設備)の開発・製造・販売を通して、技術やノウハウの蓄積とともに、ユーザーのニーズの合致した製品開発を行い、高い実績を有している。

【

5-2-1 実施体制

(1) 実施体制

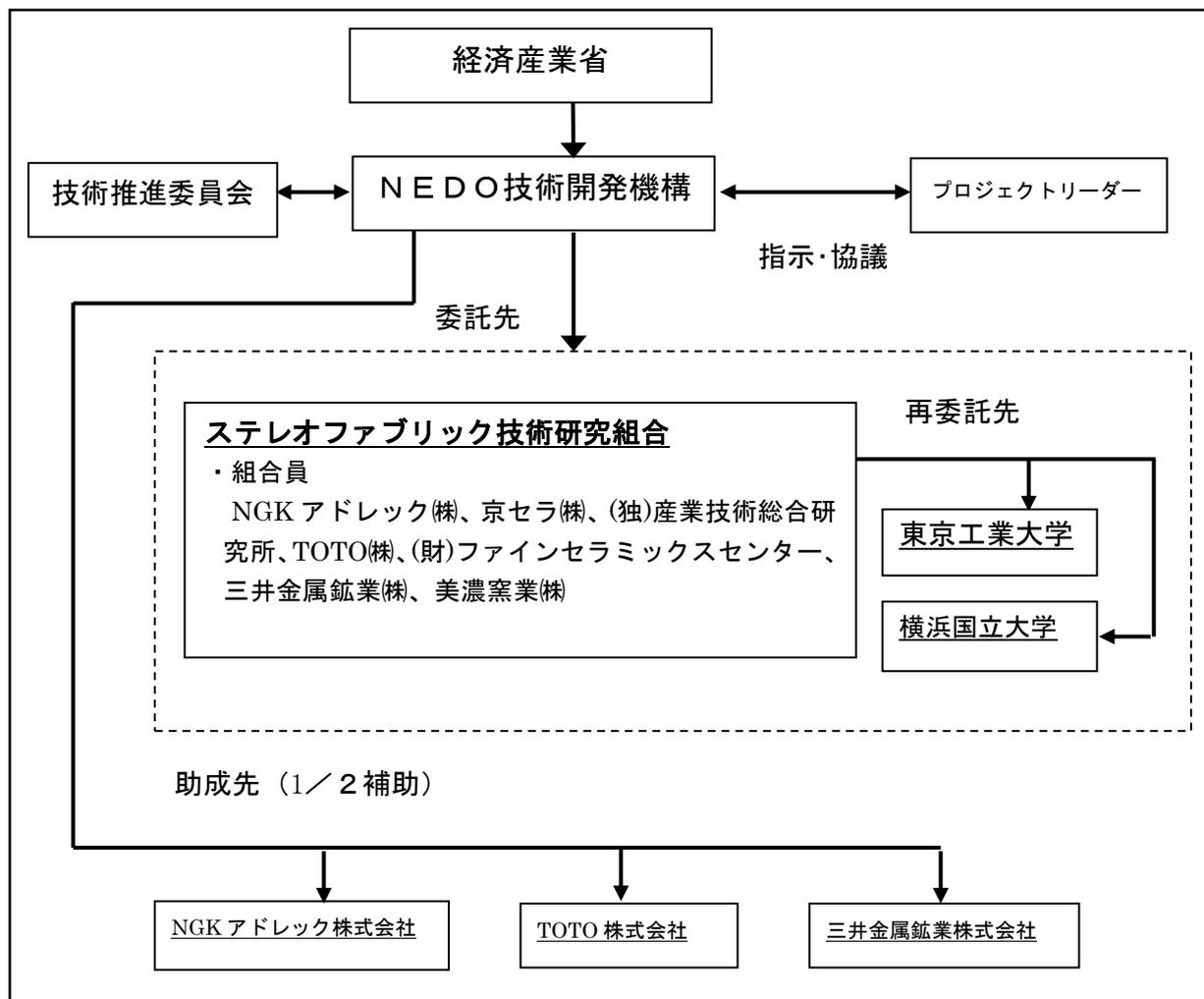


図5-2 革新的省エネセラミックス製造技術開発 研究実施体制図
(平成21年度、22年度)

平成21年10月に、ステレオファブリック技術研究組合が NEDO から受託し、再委託先として、東京工業大学、横浜国立大学へ研究を再委託した。

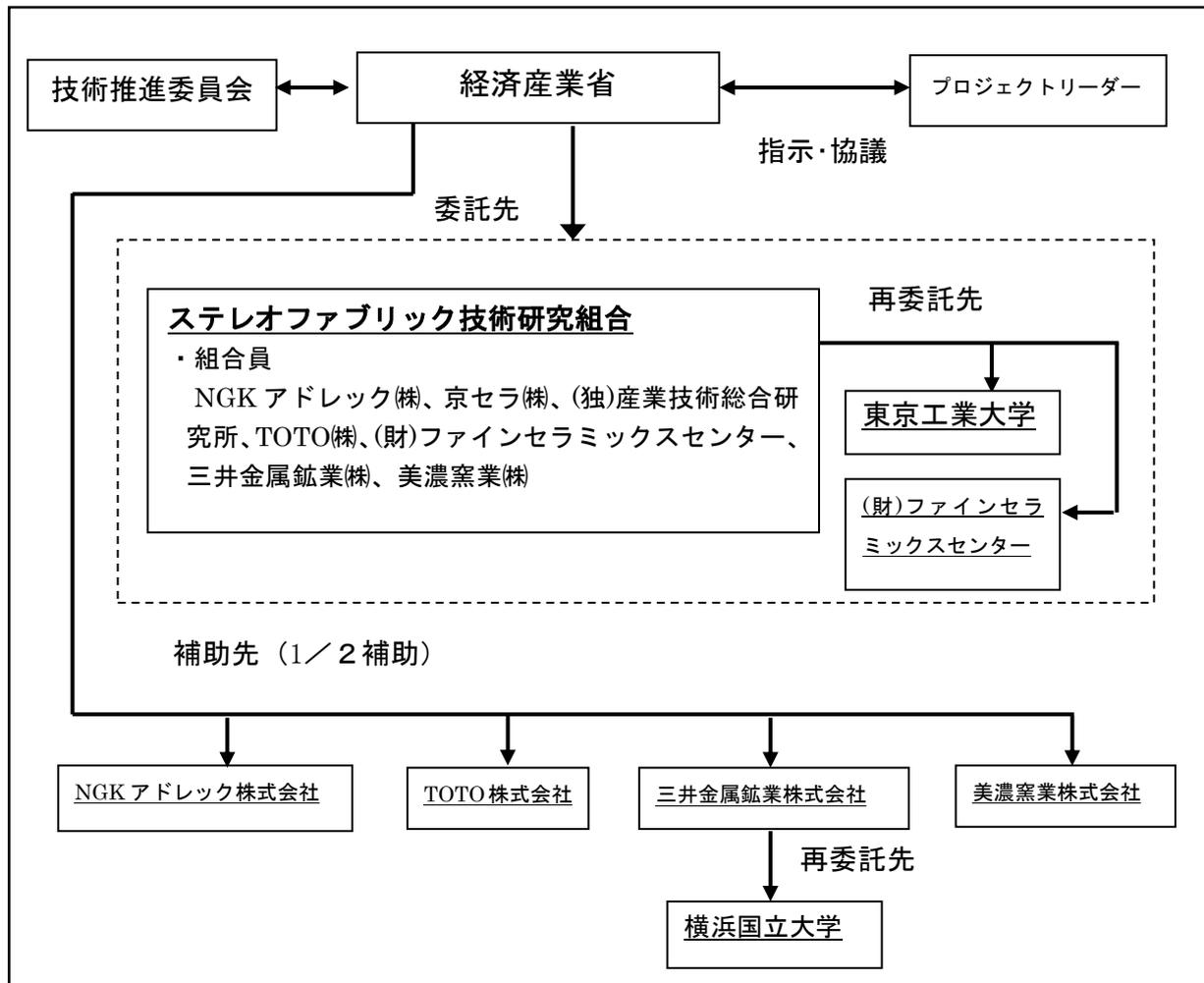


図5-3 革新的省エネセラミックス製造技術開発 研究実施体制図
(平成23年度)

平成23年度に、経済産業省からの直執行となるとともに、研究体制を見直し、横浜国立大学を補助事業先である三井金属からの再委託とし、新たに技術研究組合からはファインセラミックスセンターを再委託先とすることとした。

また、基礎研究で培った基盤技術を基にして、美濃窯業を補助事業先とすることとした。

これらは、研究が進展している中で、より実用化、事業化に向けた芽が出てきたことと、研究を絞り込むという過程で、より理想的な研究実施体制に近づいてきたものとする。

5-2-2 制度の運営

(1) 採択審査

・審査方法

外部の有識者からなる事前審査委員会と機構内に設置される契約・助成審査委員会の二段階で審査を実施。

契約・助成審査委員会では、事前審査の結果を踏まえ、機構が定める基準等により審査を実施。

・審査基準等

研究開発項目毎に審査を行い、採択審査委員会審査基準に基づき、評価し、5段階による採点を付けたものを、採点結果とした。総合評価点4.0点以上の提案を採択。

(事前審査の基準)

<委託事業>

- (1) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。(不足、不必要な部分はないか。)
 - (2) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
 - (3) 共同提案の場合、各社の提案が相互補完的であるか。
 - (4) 提案内容・研究計画は実現可能か。(技術的可能性、計画、最終目標の妥当性等。)
 - (5) 提案者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか。(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等。)また、国外の研究機関等との平行支援等の自国費用自国負担による国際連携として提案された場合は、その国際連携の内容が、国内研究機関等のみの連携よりもメリットがあることが明確であるか(プロジェクトが生み出す成果の質が向上する、実用化・事業化までの期間の短縮が期待される等)。特に相手国研究機関等がNEDOの指定する相手国の公的支援機関(NEDOホームページ上に別掲)の支援を受けようとしている(または既に受けている)ものである場合には、その妥当性が確認できるか等。)
- ※「平行支援(コ・ファンディング)制度」:国際共同研究における各参加機関への費用支援は、それぞれの国の研究支援機関等により自国参加機関分ついて個別に判断して行うもの。
- (6) 提案者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果が期待できるか。(企業の場合、成果の実用化が見込まれるか。)
 - (7) 助成事業との関係が明確になっているか。(例としては、助成事業に参加するか、若しくは助成事業(実用化技術)を行っている事業者との連携を有するか、または連携をとる体制が準備されているか等)
 - (8) 総合評価

(委託予定先に関する選考基準)

委託予定先は、次の基準により選考するものとする。

- (1) 委託業務に関する提案書の内容が次の各号に適合していること。
 - 1) 開発等の目標がNEDO 技術開発機構の意図と合致していること。
 - 2) 開発等の方法、内容等が優れていること。
 - 3) 開発等の経済性が優れていること。
- (2) 当該開発等における委託予定先の遂行能力が次の各号に適合していること。
 - 1) 関連分野の開発等に関する実績を有すること。
 - 2) 当該開発等を行う体制が整っていること。(再委託予定先、共同研究相手先等を含む。国際共同研究体制をとる場合、そのメリットが明確であること。また、特にNEDOの指定する相手国の公的資金支援機関の支援を受けようとしている(または既に受けている)場合はその妥当性が確認できること。)
 - 3) 当該開発等に必要な設備を有していること。
 - 4) 経営基盤が確立していること。
 - 5) 当該開発等に必要な研究者等を有していること。
 - 6) 委託業務管理上NEDO 技術開発機構の必要とする措置を適切に遂行できる体制を有していること。
- (3) 委託予定先の選考にあたって考慮すべき事項
 - 1) 優れた部分提案者の開発等体制への組み込みに関すること。
 - 2) 各開発等の開発等分担及び委託金額の適正化に関すること。
 - 3) 競争的な開発等体制の整備に関すること。
 - 4) 公益法人、技術研究組合等を活用する場合における役割の明確化に関すること。

- 6) 助成事業(実用化技術)との関係に関すること。
- 5) その他主管部長が重要と判断すること。

<助成事業>

(事前審査の基準)

助成事業者の採択に際しては、次の視点から審査するものとする。

(1)事業者評価

事業者の技術、財務、事務管理、その他事業遂行に必要な能力があるか。

(2)事業化評価

当該事業の新規性、市場創出効果、社会的目標への有効性、企業化計画の妥当性はあるか。

(3)技術評価

申請された技術開発項目について、基本計画との整合性及び技術開発のレベル、助成事業計画の妥当性、産業界への波及効果はあるか。

(4)実施体制評価

委託事業(共通基盤技術)との関係が明確になっているか。(例としては、委託事業に参加するか、若しくは委託事業(共通基盤技術)を行っている事業者との連携を有するか、または連携をとる体制が準備されているか等を審査する。)また、国外の研究機関等とのパラレル支援等の自国費用自国負担による国際連携として提案された場合は、その国際連携の内容が、国内研究機関等のみの連携よりもメリットがあることが明確であるかを審査する(プロジェクトが生み出す成果の質が向上する、実用化・事業化までの期間の短縮が期待される等)。また、特に相手国研究機関等がNEDOの指定する相手国の公的支援機関(NEDOホームページ上に別掲)の支援を受けようとしている(または既に受けている)ものである場合には、その妥当性についても審査する。

※「パラレル支援(コ・ファンディング)制度」:国際共同研究における各参加機関への費用支援は、それぞれの国の研究支援機関等により自国参加機関分について個別に判断して行うもの。

(助成金の交付先に関する選考基準)

助成金の交付先は、次の基準により選考するものとする。

(1)助成金交付申請書の内容が次の各号に適合していること。

- 1)助成事業の目標が機構の意図と合致していること。
- 2)助成事業の方法、内容等が優れていること。
- 3)助成事業の経済性が優れていること。

(2)助成事業における助成事業者の遂行能力が次の各号に適合していること。

- 1)関連分野における事業の実績を有していること。
- 2)助成事業を行う人員、体制が整っていること。
- 3)助成事業の実施に必要な設備を有していること。
- 4)経営基盤が確立していること。
- 5)助成事業の実施に関して機構の必要とする措置を適切に遂行できる体制を有していること。

・採択実績等

応募、採択実績

年度	H15
公募日	3/18
計画提出期限	4/27
交付決定日	6/9
応募件数	4
採択件数	4
倍率	1.0

(2) 事業の進捗管理

事業の進捗管理に関しては、プロジェクト全体に関してプロジェクトリーダーが実施し、委託事業に関しては、ステレオファブリック技術研究組合が実施してきた。

具体的には、下記の管理体制、会議体によって、進捗管理を実施した。

表5-5 事業の進捗管理

会議の名称	主旨	頻度	出席対象者
集中討議 (技術推進委員会)	研究の進め方、進捗を確認して、情報を共有すること	3ヶ月に1回	NEDO 関係者、経済産業省関係者。出向研究員、産総研研究員、組合員企業、大学関係者等
推進会議	集中討議での結果を踏まえて、研究の方向性を軌道修正すること、月次での進捗管理	月1回	出向研究員、産総研研究員、JFCC 研究員
個別会議	研究の過程で、個別で発生する案件の検討、進捗管理を実施	週1回	出向研究員
発明審査委員会	発明案件の審議、発明の発掘、持分等を決定	都度実施	出向研究員

PL、組合技術部長、組合参与(知財担当)は、すべての会議に出席

5-3 資金配分

○資金配分は、事業を円滑に推進するための研究設備や人件費、資材費等、概ね妥当であった。
 ・資金の過不足はなかったか。
 ・研究計画に基づき、効果的かつ有効的に資金配分を重点的に行い、それによる効果も得られており、資金の内部配分は他動であった。

表5-6 プロジェクト全期間における予算配分

単位:千円

年度、平成	21年度	22年度	23年度	合計
NEDO 管理費	12,358	8,400	0	20,758
委託事業	214,690	139,413	228,109	582,212
助成事業(補助事業)	53,480	89,788	81,891	225,159
エヌジーケイ・アドレック	28,437	18,300	18,300	65,037
TOTO	20,598	64,752	8,000	93,350
三井金属鉱業	4,450	6,736	19,991	31,177
美濃窯業	0	0	35,600	35,600
総額	280,528	237,601	310,000	828,129

5-4 費用対効果

1)セラミックス製造時の省エネ効果

大型・複雑形状のセラミックス構造部材を小型セラミックスブロックの組み合わせで製造することにより、製造時のエネルギー消費量の削減が可能である。 $6,484\text{億円} \times \text{普及率}20\% = 1,297\text{億円}$ 、したがって、セラミックス製造時の省エネルギー効果は $16,766\text{L}/\text{億円} \times 1,297\text{億円} = 2.17\text{万kL}$ (2030年)、 1.4万KL (2020年・普及率13%)が見込まれる。

2)省エネセラミックスを他産業に使用した際の省エネ効果

大型・複雑形状のセラミックス構造部材を溶融アルミニウムの搬送容器、熱化学プラント、リチウムイオン電池(LIB)正極材製造用炉心管に適用した場合には、省エネ化が進み、2020年、2030年それぞれに対して原油換算で19.9万KL、32.7万KL、CO₂換算では同様に52.1万ton、85.7万tonの削減効果が期待できる。

ここでは、製造部材用途を想定しているが、本事業で得られる成果は、太陽熱発電や地熱発電に求められる大型セラミックス配管、断熱容器等への波及展開も期待できる。以上より本プロジェクトの予算規模(H21-H25) 10億円に比べて十分な効果が得られるものと考えられる。

5-5 変化への対応

1)状況・進捗に対応した体制の見直し

・H21、22年度に実施された集中研成果である「卑金属の亀裂内への超浸透利用 B₄C 接合」の実用化を加速するために、実施先企業として美濃窯業(株)が最適と判断し、同社を担当とする実用化補助事業を

H23 年度より開始した。

・同じくH21、22 年度において組合からの再委託先であった横浜国大を、H23 年度より補助事業担当の三井金属鉱業からの再委託に切替え、大学と企業の連携を密接にすることで基礎研究成果の実用化に向けた開発の効率化をはかることとした。

2) 加速財源の獲得

・H21、22 年度、実用化を推進するために加速財源の獲得を行った。

3) 総額予算減額に伴う予算配分見直し

・H22 年度予算は予定 2.5 億円に対して、決定が 1.7 億円と大幅減額となった。この状況に対して、本事業では実用化に近い研究を優先するとの方針を明確にし、補助事業を優先した予算配分の見直し、また集中研内部の計画も優先度を付け内容を絞り、無駄を徹底的に省くことを徹底した。

4) プロジェクトの計画前倒し

・プロジェクトの進捗、目標達成状況、技術移転の可能性を慎重に検討し、基礎研究を担当する集中研については、当初の 5 年計画を 2 年前倒しで 3 年目で収束させ、後段の 2 年間は補助事業に集中することを決定した。

5) 社会情勢変化への対応

・再生エネルギーへの転換の動きが加速する社会情勢に対応すべく、本事業で得られた成果(大型セラミックス接合部材、蓄断熱技術等)の太陽熱、地熱発電等の再生可能エネルギーシステムへの適用可能性に関する市場調査を実施中である。

以上

第3章 評価

第3章 評価

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

対象とするセラミックス部材の高効率大型化技術開発が産業界の広い意味での省エネ化に資するとの本事業の目的は明確であり、省エネルギー技術戦略 2011 に則った本事業の政策的な位置付けは妥当である。

また、本技術開発は、セラミックス構造体の大型化を目指したもので多様な分野への適用が可能な実用性の高い技術であり、構造用材料に用いるための接合技術は不可欠である。接合技術の基礎的研究から、部材開発までの一連の研究を実施することにより、国際的な製品競争面での高付加価値化などで優位になるものであり、公的研究機関と企業との密接な連携のためには国の関与が必要である。

セラミックスの場合にはスケールアップが必ずしも容易ではなく、大型化のための解決方法及び大型化したときの信頼性を確保できるのかなどを検討する必要がある。

また、省エネルギーをエクセルギー等、何らかの指標を用い、ある程度定量的に示す必要がある。委託事業及び補助事業の予想成果が、省エネルギー技術戦略のうち、いつ、どの程度寄与するのかを事業全体として明示すれば、政策全体での位置付け、重要性をよりわかりやすく表現できると考える。

更に接合技術が波及、拡大するような取り組みも必要であり、可能な限り他の産業分野に応用が可能になる知見を提供できるものであることが望まれる。

【肯定的意見】

- ・対象とするセラミックス部材の高効率大型化技術開発が産業界の広い意味での省エネ化に資するとの本事業の目的は明確である。
- ・事業としての国際的競争力を維持しつつ、エネルギー効率の向上を図ることは、国内事業の維持発展には欠かせず、省エネルギー技術戦略 2011 に則った本事業の政策的な位置付けは妥当である。
- ・省エネは、これからあらゆる分野で要求され重要なことであり、時代に即応した課題である。しかし、省エネのために製品の品質を下げるのがあってはいけないうことであり、品質を向上させつつ省エネを目指すことは当を得ている。
- ・本革新的省エネセラミックスの開発は、セラミックス構造体の大型化を目指したものであり、すぐに製品化が可能な市場があるわけではないことから、民間主導で研究開発を期待することはできない。しかし、この技術の波及効果は大きく、日本の世界における先進性を維持、発展させるためには、公的な支援がない限り、革新的な研究・技術開発を行うことはできない。その点、本プロジェクトにより、かなり大胆な研究投資が行われ、ほぼ当初の目的を達成できる段階に達していることは、高く評価できる。
- ・日本の製造業はグローバル市場での製品競争が激しくなる中で、高性能な製品・システムを国内・国外のユーザーに販売するには、省エネルギー技術を駆使した優れた製造方法が強く求められている。こうした状況の中で、セラミックスの利用技術では優れた基盤技術を持ち、材料から部品製造や製品応用までの一連の開発・製造体制を持つ日本がその強みを生かして、セラミックス部品を製品製造や製品仕様の高性能化を実現するキー部品として活用することは国際的な製品競争面での高付加価値化などで優位になる。こうしたセラミックス製のキー部品は今後、石油や天然ガスなどのエネルギー価格の上昇が予想される中で、部品の製造コストの低減や、製造・使用時の温暖化ガス削減に寄与するからだ。さらに、中小企業が多い国内のセラミックス部品の製造企業に対して仕事を確保し、国内での雇用確保にも貢献する可能性を高めると予想される。
- ・本事業はセラミックス部品を小さなユニットとして、それを組み合わせて、大型で複雑な高性能部材や製品をつくり出すという独創的・先進的な手法を実現することによって、セラミックス部材事業を革新する可能性を明らかにした。日本国内でセラミックス部品など製造する企業が現在保有している生産設備をいくらか改良・改善することで新しい事業を産み出すことができるからだ。日本国内で製造業が競争力を高める可能性を明らかにした点で、社会

的な意義を持っている。こうした日本のセラミックス部品などの製造企業の技術力を高める事業は、日本の製造業全体の競争力を強化する点で、国が重点的に支援する意義を持っている。

- ・セラミックスを構造用材料に用いるためには、接合技術は不可欠であり、金属材料と異なり、溶接という方法をとることができない。セラミックスでは反応焼結あるいは部分的な熔融など、セラミックスの本性を良く理解しない限り、要求性能を満足できる接合構造体を形成することはできないことから、基礎研究との連携が必須である。その点、本プロジェクトでは、日本で考えられる最高レベルの研究機関、民間企業が一体となって革新的・先導的な成果を達成しつつある。
- ・大型部材化技術の事業化・普及はリスクが高いと予想され、国際的に競争力のあるセラミックス産業への波及効果の期待を含め、国としての関与の緊要性は極めて高い。
- ・環境問題ならびに我が国の経済競争力を維持強化するうえで、省資源・省エネルギー技術の開発は重要な課題であり、本事業の政策的意義は大きい。そのため、軽量で耐熱性・耐食性に優れたセラミックスを活用すること、さらに省エネ製造プロセスを開発することは、目的として妥当である。一方、セラミックスの接合技術は、これまでも研究されてきたが、その困難さから必ずしも実用化されていない。本事業は、セラミックスの接合技術を開発し、大型部材の効率的な製造技術を確立するものであり、革新的である。これが実用化されれば、省エネ効果は大と判断される。ただし、接合技術の基礎的研究から部材開発までの一連の研究を実施するには、公的研究機関と企業との密接な連携が必要であり、国の関与が必要である。また、開発目標とする製品は具体的であり、社会的ニーズは高い。
- ・複雑形状の付与や大型化といった従来技術では困難なニーズに対し、小さな精密ブロックを立体的に組み上げ一体化することにより、所望の複雑形状、大型化を効率的に作製する革新的なプロセス技術である。この技術は、多様な分野への適用が可能な実用性の高い技術である。
- ・セラミックス製造技術、省エネ製造プロセスは極めて重要であり、科学技術基本計画、経済産業省が推進している技術戦略マップに沿ったプロジェクトである。このようナリスクの伴う技術開発は、企業のみでの研究では限界がある。個別の研究では、直近の技術開発に取り組むのがせいぜいで長期的な視野にたった取り組みは困難となっており、産官学の連携した取り組みが必要である。

【問題点・改善すべき点】

- ・実用化の見通しを明かにしていくためにも、現行での製品、手法と比較して、コスト面で成立する方法なのかを示す必要があるように思われる。また、セラミックスの場合には、金属材料と異なり、スケールアップが必ずしも容易ではなく、大型するための問題はなにか、解決方法は何か、大型化したときの信頼性を確保できるのかなどを検討する必要がある。また、省エネを謳っている以上、どの程度省エネを達成できるのかを示す必要があるように思われる。セラミックス大型構造体を作製する際の省エネの程度、さらにその製品を用いることによる省エネを、エクセルギー等、何らかの指標を用い、ある程度定量的に示す必要があるように思われる。
- ・本事業の委託事業、補助事業の予想成果が、省エネルギー技術戦略のうち、いつ、どの程度寄与するのかを事業全体として明示すれば、政策全体での位置付け、重要性をよりわかりやすく表現できると考える。
- ・実用化を目指した研究の意義は理解できるが、そのため対象材料が絞られており、様々なセラミックスにも適用できるのかの問題はある。さらに、接合技術が拡大するような取り組みも必要と感ぜられる。
- ・多額の税金を投入して国家プロジェクトとして取り上げる限り、終了した後は、可能な限り他の産業分野に応用が可能になる知見を提供できるものであることが望まれる。例えば、本事業では、熔融アルミニウム搬送容器の確立は、この容器のみの開発にとどまること無く、

高温容器（各種鉄鋼炉やガラス溶解炉など）に応用できる基本技術の構築への可能性も配慮してほしい。

- 今後スケールに際しての予想外の課題が起こりうる。課題を科学的に対処する従来の集中研（委託）に代わる組織、体制が望まれる。

2. 研究開発等の目標の妥当性

目標値の設定は、十分な基準値が設定されている。既存製品のベンチマークを踏まえた、製品化を意識した具体的な研究項目が設定されており、その指標も具体的であり、指標を達成するための計画が十分に練られており、中間時点としては適当な値となっている。

また、委託事業から時間を置かず実部材を開発する補助事業を各企業が推進するという新しい開発体制の構築により、委託事業での“基礎研究成果の製品化”を実施している。

ただし、目標設定について形状を大きくした際の最終目標値の接合強度、断面積との関連性、大型形状のときの欠陥の増加及び破壊確率の増大についてどのように計算できるのか根拠を明確にする必要がある。

集中研として研究成果を上げた基盤研究成果は、今後、委託事業を担当した企業以外の国内企業に、どのように基盤研究成果を技術移転していくのかという方法論も明確にしておくべきである。委託事業に参加していない国内のセラミックス部品の製造企業などに、基盤技術研究の公表可能な部分を技術移転していくのか、実施者の技術組合及び産総研として方針を明確にすべき。

また、今後は本事業で想定している製品以外にも応用できるようにすることを目標とした開発が求められる。

【肯定的意見】

- ・ 目標値の設定は、世界最高水準であり、中間評価時点では十分な基準値が設定されている。特に、セラミックスにおいて接合強度が200-300MPaは十分高く、実用レベルとしても十分で、むしろ母材のセラミックスの強度にほぼ匹敵している。溶融アルミニウムとの反応性についても、十分高いレベルの温度・時間が設定されている。
- ・ 既存製品のベンチマークを踏まえた製品化を意識した目標が設定されている。
- ・ セラミックス部材の実用化では、損傷・破壊挙動のスケール効果（部材の大きさによる挙動の変化）をエンジニアリング的に把握することが重要である。その観点で、対象とする大型部材の大きさを意識した目標設定が研究開発項目毎に設定されており、設定理由と根拠は明確であると考えられる。
- ・ 実用化を目指して具体的な研究項目が設定されており、その指標も具体的であり、それを達成するための計画が十分に練られている。
- ・ 産総研中部センターなどに集中研拠点を設け、セラミックス部品をユニット化し組み上げて、大型で複雑な高性能部材づくり出す独自技術の基盤研究を委託事業として実施しながら、ほぼ同時に実部材を開発する補助事業を各企業が推進するという新しい開発体制を構築した。これによって、委託事業での“目的基礎研究”化を実施している。補助事業で実際に製品化するターゲットが明確なために、限られた期間・予算内で今後のステレオファブリック技術に必要とされる研究開発テーマを短期間で絞り込み、補助事業の開発の基盤となる目的基礎研究のテーマ目標をラボレベルで設定し、実施した。
- ・ 委託事業では、補助事業の開発を支援するための具体的な目標達成度を設定し、その研究成果を判定している。補助事業では担当した各社は、実部材のプロトタイプ作成までを開発目標を設定し、それを達成する途中までの成果を報告している。その達成成果と特許取得件数など合わせて考えると、中間目標時点では一定の成果を上げているといえる。ただし、中間目標時点では、各社の事業化時のノウハウ確保などの関係で、目標ゴールの製品仕様などを明確にできない事情があるために、正確に開発成果の達成度は見積もれないものの、各社が必要とする要素技術に対する開発技術力を向上させるという点で、ある程度開発成果を上げていると判断することはできる。
- ・ セラミックス接合技術に関しては、新規性があり、セラミックス部材の将来の発展に重要な要となるもので、適切かつ妥当であるとみられる。
- ・ 各研究開発項目に対して、明確な目標および水準が設定され、その根拠が示され、指標設定も極めて適切である。

【問題点・改善すべき点】

- 接合強度が200MPaあるいは300MPaを達成する中間段階での断面積が12mm²を設定しているが、その根拠が明確でない。形状を大きくした際の最終目標値の、接合強度150MPa、断面積2500mm²との関連性、大型形状のときの欠陥の増加、破壊確率の増大について、どのように計算できるのか、もう少し説明が必要と思われる。鋼板相当の鉄と実質的に反応しない、あるいはアルミ溶湯と実質的に反応が認められない、という「実質的」の意味がどういうことなのか、あまり明確でない。これらの温度で酸化や反応が全くないことはなく、許容範囲をある程度、概数でも、数値を示すことはできないのか。
- 集中研として研究成果を上げた基盤研究成果は、今後、委託事業を担当した企業以外の国内企業に、どのように基盤研究成果を技術移転していくのかという方法論が具体的にはあまりよく分からなかった。委託事業に参加していない国内のセラミックス部品の製造企業などに、基盤技術研究の公表可能な部分を技術移転していくのかを、技術組合として、また産総研として方針をもっと鮮明にした方がいいと感じた。
- 熔融アルミニウム搬送器に関して、重要と思われるものの、この容器以上に省エネルギーを必要としている高温使用容器（各種鉄鋼炉やガラス溶解炉など）の省エネ化の方がより重要と思われる。したがって、熔融アルミニウム搬送器に関する開発を進めるに際し、これを一つの開発例とみなし、他の高温容器にも応用できるようにすることを念頭において、開発を進めてほしい。
- 革新的省エネセラミックス製造技術開発では、「省エネ技術」と「製造技術」の革新を指向しているはずで、目標達成度の基準値を具体的に求められすぎ、それを達成するためにエネルギーが注がれ、革新性に費やす時間を殺ぐことになっていないか気になる。事業の性格を考慮した目標設定基準が必要と思われる。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

それぞれの実施テーマ（高温断熱、高比剛性等部材）について、すでにプロトタイプが作製されており、実用化に向けた取り組みが着実に進んでおり、中間評価時点で、基盤研究としては十分な成果を上げたといえる。

数値目標は、全ての項目で達成しており、中には、かなり凌駕しているものもある。全体として、目標の達成度は高く、接合強度の幾つかは、世界最高と言ってもよく、接合体の組み合わせによって、従来、想像もできなかったセラミックス構造体が得られており、実用化に向けて大きく進展しつつある。

一方、より実用化の可能性を高めるため、次の段階のさらなる大型化に向けた問題点の抽出、その対策についての施策を提示することが必要である。

最終的な実用化にとって、コストの検討は重要であり、製作時及び使用時などで多くの破損の可能性があるが、それらが、全てコストに反映されるため、妥当な範囲のコストで目標値を達成できているのかの検証が必要である。各課題全体での省エネ効果はどうだったかの具体例を示すことも重要である。

接合一体化技術をセラミックス大型化の将来の幅広いニーズに継続して呼応していくためには、標準化を含めて産業界でより幅広く使える技術手段としていくことも必要である。

【肯定的意見】

- 数値目標は、全ての項目で達成しており、中には、かなり凌駕しているものもある。全体として、目標の達成度は高く、接合強度の幾つかは、世界最高と言ってもいい。また、接合体の組み合わせによって、従来、想像もできなかったセラミックス構造体が得られており、実用化に向けて大きく進展しつつある。
- 世界的に見て技術的に困難が予想されるセラミックスの大型化に目標を持ってチャレンジし、一定の成果が得られていると判断する研究開発毎に設定した目標を個別に達成しており、アプローチおよび達成成果の考え方と科学的な分析・解釈も妥当である。
- セラミックスの成形技術、接合技術について、大きな進展がみられ、その設定目標もおおよそ達成されている。また、それぞれの項目について、すでにプロトタイプが作製されており、実用化に向けた取り組みが着実に進んでいることが伺われる。
- 委託事業でのニアネット成形・接合技術の開発では、焼結時の収縮挙動を3次元で把握し、母材並みの接合強さを各セラミックス試験材で達成することを確立した。高機能化では、アルミ溶湯に対する耐性を持つユニット部材を見いだしたりするなど、委託事業の開発に必要な基盤技術の開発にメドをつけた。中間評価時点で、基盤研究としては十分な成果を上げたといえる。委託事業では、集中研で確立した各要素技術の技術移転を実施した。例えば、ユニット部材の組み合わせの際に必要な接合技術を、出口目標のセラミックス部材の開発に必要な技術として吸収した。このため、補助事業の開発を順調に進行させる開発基盤が築かれつつあるといえる。
- 中間評価時点での達成すべき具体的かつ明確な水準が設定されており、指標設定も適切で、いずれの項目も十分達成している。ステレオフィブリックのモデルとして、窒化珪素中空ユニット、炭化ホウ素の接合体によるリブ構造体などの作製例が示されている。

【問題点・改善すべき点】

- 目標は達成しているが、次の段階のさらなる大型化に向けた問題点の抽出、その対策についての施策を提示することにより、さらに実用化の可能性が高まる。セラミックス構造体の大型化、接合体の製造にとって、欠陥に対する定量的な理解とその対策は不可欠であり、コストを考える上でも極めて重要である。特に、最終的な実用化にとって、コストの検討は重要であり、製作時の破壊、使用時の破壊など、多くの破損の可能性があるが、それらが、全てコストに反映される。妥当な範囲のコストで目標値を達成できているのかの検証が必要ではないのか。

- 対象である接合一体化技術をセラミックス大型化の将来の幅広いニーズに継続して呼応していくためには、標準化を含めて産業界でより幅広く使える技術手段としていくことも必要であると考え。特に、産総研での委託事業成果を基にした、継続的な研究開発活動を期待したい。一律的な数の評価は無意味ではあるが、開発成果と産業普及の重要性を考えれば知的財産の取得数が少ないと考える。今後の奮起を期待したい。
- 実用化志向の事業であるが、接合技術の研究としての広がりのためには、論文発表を増やす必要も感じられる。
- 中間目標時点では、出口目標のセラミックス部材に対してかなり近づいたと評価できるが、実際の出口目標のセラミックス部材の仕様を確定した上で、評価しないと正確な評価ができないために、終了評価時点で再評価しないと確定的なことはいえない。今回は、あくまで時間的に中間時点での成果評価であると補足説明をしたい。
- 熔融アルミニウム搬送器に関して、実用化する場合最大でどの程度の容量のものまで想定しているのか分からないのですが、かなり大型で（繰返して）長時間使用するとした場合、使用中に容器のどこか局所的に損傷が生じた場合、その部分の取替え（修理）が可能で、再使用ができるのか。その場合を想定して、修復（ユニットの取り替え）が容易にできる方法も考案しておくといよいと思われる。
- 革新的省エネという課題名から、各課題全体での省エネ効果はどうだったかの具体例を示すことも重要と思われる。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

セラミックスの接合による大型構造体の作製にほぼ目途が立ったことは、事業化を見通す上で大変期待が持てる。接合強度も十分であり、世界最高レベルのセラミックス構造体が作製されている。個々の補助事業において、具体的な事業化のイメージが提示されており、日本のセラミックス技術が世界最高レベルであることを伺わせる。

本事業では補助事業によって、各担当企業が事業化を決断できる出口目標のプロトタイプを開発し、事業終了後に自社で事業化計画を進めることが“事業化見通し”といえるため、担当企業各社は事業化見通しを立てるために、十分な中間目標を達成したと評価できる。

一方、アルミニウム溶湯球状容器について、軽量、断熱性に優れていると思えるが、アルミニウム溶湯の搬送以外の、さらに高温での過酷な条件で使用される高温容器としての発展の見込みがあるのか、今後こういった波及効果も念頭において開発を進めて欲しい。実用化のための問題点、解決すべき事項、ロードマップをもっと詳しく、具体的に示す必要があるのではないか。

中間評価時点で、その後の特許の審査請求件数の見通しがいまいな点は、特許出願時に特許戦略を十分には練り上げていないということに起因すると推定される。今後の一層のグローバル化対応では、研究開発時点での戦略立案能力が問われる可能性があるといえる。

【肯定的意見】

- ・セラミックスの接合による大型構造体の作製にほぼ目途が立ったことは、事業化を見通す上で大変期待が持てる。接合強度も十分であり、世界最高レベルのセラミックス構造体が作製されている。各種、高温部材への波及効果は十分に見込むことができる。個々の補助事業において、具体的な事業化のイメージが提示されており、日本のセラミックス技術が世界最高レベルであることを伺わせる。
- ・成果の早期実用化の観点で、潜在顧客との情報交換、連携を模索しつつ研究開発を行う方針であり、進め方は妥当である。
- ・個々の補助金テーマにおける産業利用上の意義と実用化の進め方には無理はなく、委託事業成果の転用の観点も妥当である。
- ・実用化の見通しについては、要素技術としての開発は終えつつあり、早期の製品としての実用化を期待したい。
- ・接合技術について、設定目標をほぼ達成しており、プロトタイプでの実績もあげており、今後さらに大型品作製への取り組みにより、実用化と事業化は大いに期待されるものと考えられる。
- ・本事業では補助事業によって、各担当企業が事業化を決断できる出口目標のプロトタイプを開発し、事業終了後に自社で事業化計画を進めることが“事業化見通し”といえるため、担当企業各社は事業化見通しを立てるために、十分な中間目標を達成したと評価できる。波及効果面では、各補助事業を担当した各社が事業化に成功し、同様のセラミックス部品をユニット化し組み上げるステレオフィブリック技術を実用化したいという企業が登場し、集中研の中核を担った産総研中部センターが技術支援を実施すれば、波及効果が上がるといえる。このため、その波及効果の潜在能力を高めたと評価できる。
- ・接合技術については、事業化の見通し、波及の効果も期待できるようにみられる。
- ・大型セラミック部材、接合、断熱などの技術は、汎用的な技術であり、多方面への展開が期待される。特に、今後重要性が増す様々な再生利用可能エネルギーシステムへの展開は、異業種の参加企業の連携を契機に新分野への展開が期待される大きな波及効果である。また、軽量、高い剛性、優れた衝撃吸収特性を持つ B4C の接合体技術は、継続的なネットワークによる技術レベルの向上により、ロボットアームとしての展開、電子部品への展開が期待される。

【問題点・改善すべき点】

- ・実用化は、単に、性能が高いだけでは達成できない。それまでに多くの課題がある。実用化のための問題点、解決すべき事項、ロードマップをもっと詳しく、具体的に示す必要があるのではないか。開発したものをを用いる市場の大きさ、製品のコストについての検討が必要ではないか。用途が概してエネルギー多消費型や半導体・液晶など大量生産を目指したものである。中国やその他発展途上国に産業が移転しつつあるような分野であり、国内での需要が見込めるのかなど、総合的に、経済性を検討する必要があるのではないか。
- ・中間段階でもあり、研究発表、論文、特許の数は、ほぼ、適当な数であるが、今後、特許出願の段階に終わらず、特許を取得するよう期待する。研究開発の成果を新聞雑誌に広く喧伝してほしい。
- ・本事業の波及的な目的の一つにセラミックス製造プロセスの省エネ化がある。地味ではあり表には出づらいテーマではあるが、ニーズを粘り強く探索し、開発成果の幅広い実用化を行って欲しい。
- ・参画企業の製品開発のための技術開発に重きをおいている面は、本事業の性格上仕方ないと思われるが、開発技術の波及が望まれるところである。
- ・技術組合に参加した産総研と各企業は十分な特許出願件数とノウハウ保有件数を示している点では、大きな研究成果を上げている。しかし、中間評価時点で、その後の特許の審査請求件数がいまいちな点は、特許出願時に特許戦略を十分には練り上げていないということに起因すると推定される。この理由は日本の多くの企業が知財戦略の立案機能をまだ会得しきっていないためと推定できる。今後の一層のグローバル化対応では、研究開発時点での戦略立案能力が問われる可能性があるといえる。
- ・アルミニウム溶湯球状容器は、軽量、断熱性などに優れていると思えるが、アルミニウム溶湯の搬送以外の、さらに高温での過酷な条件で使用される高温容器としての発展の見込みがあるのか、今後こういった波及効果も念頭において開発を進めて欲しい。
- ・出口製品が明確で、そのための開発目標もはっきりしているが、世界的な産業構造変化を考える必要も早急に望まれる。例えば、アルミインゴットから溶湯輸送の場合、2次合金業者から自動車メーカー・部品メーカーまでの輸送は、どこで行われ、どの程度の安全性が必要なのか、等。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

研究開発実施者の実施体制・運営について、進捗管理票を用いたり、技術推進委員会で定期的に集中討議や推進会議を開催するなど、産学官が効率的に研究開発を遂行するのに適したフレキシブルな運営体制を実践しており事業の進捗管理マネジメント面で優れていると評価できる。

集中研方式の委託事業と各企業による補助事業をスタートさせ、省エネ技術を対象とした技術開発は具体的であり、出口イメージを明確化したセラミックス部材の開発に目標を設定する研究開発体制が効果を上げた。

研究経費はほぼ適切で、経費に見合った成果が得られており、大きな費用対効果が期待される。

高度のノウハウを伴う技術、特許性の高い技術に対する知的所有権を共有する場合の問題はどのように解決しているのか説明が必要である。

集中研方式の委託事業で築いた基盤技術を、技術組合に参加していない企業にどう技術移転していくのかという波及効果面での仕組みについて議論を進める必要がある。

【肯定的意見】

- 研究開発実施者の実施体制・運営では、進捗管理票を用いたり、技術推進委員会で集中討議をしたり、推進会議を開催するなど、事業の進捗管理マネジメント面で優れていると評価できる。
- 産総研を集中研とし、ステレオファブリック技術研究組合を組織し、日本を代表する公的研究機関と民間企業が一体となり、研究を推進しており、研究開発体制は適切である。
- 産学官が効率的に研究開発を遂行するのに適したフレキシブルな運営体制を実践しており、プロジェクト全体としての進め方は妥当である開発項目がきわめて具体的であり、それを実現するための計画が十分に策定されている。
- 集中研方式の委託事業と各企業による補助事業をほぼ同時にスタートさせ、出口イメージを明確化したセラミックス部材の開発に目標を設定する研究開発体制が効果を上げた。同時に、技術研究組合を立ち上げ、集中研方式にとって“目的基礎研究”を進め、基盤技術を短期間で集中的に築いた点が優れている。
- 集中研において様々な技術開発がなされており、それを活用した製品展開も効率的である。また、企業での分散研でも積極的な取り組みは高く評価される。
- セラミックスの製造、利用技術において、世界的に困難が予想される大型化に関する技術課題に、製品化を意識した課題設定を行いチャンレンジしている開発自体の考え方と進め方は大いに評価できる。
- 研究経費はほぼ適切で、経費に見合った成果が得られている。
- 省エネ技術を対象とした技術開発は具体的であり、大きな費用対効果が期待される。
- 対象としている、出口、材質、手法は、多岐にわたるが、要求性能の共通性から3つの課題に分類し、最適と考えられる材質の関連が整理されている(それでも多岐にわたっている)。
- 革新的なプロセス技術としてステレオファブリック造形技術を提案し、その課題として、①ニアネット成形・接合技術、②ユニットの高機能化技術、③革新的省エネセラミックスの部材開発、を掲げ、①、②は委託事業、③は補助事業として取り組み、参加企業、法人は優れた資質を有している。
- プロジェクトリーダーの下、推進会議、推進委員会、等が、適宜開催され、課題の調整など、適切な運営が進められている。

【問題点・改善すべき点】

- 適切な費用対効果がでているかについては、開発部材の市場規模や開発コスト、省エネ効果等に関係することから、現段階での判断は困難であり、それらのデータを提出することを期待する。

- 委託事業と補助事業の棲み分けが必ずしも明確ではなく、共通基盤技術はあるものの、個々の研究課題は、ほとんど独立しているように感じる。高温接合技術を始め、本プロジェクトの内容は、各企業での技術の積み重ねによって達成されており、それらの技術を企業間で共有できるとは考えにくい。高度のノウハウを伴う技術、特許性の高い技術に対する知的所有権の共有の問題はどのように解決しているのか。
- 企業での研究成果は十分であるが、企業間での連携などが取れば、さらに新たな技術開発へと進展することが可能とも思われる。集中研方式の委託事業で築いた基盤技術を、技術組合に参加していない企業にどう技術移転していくのという波及効果面での仕組みを早めに詰める必要がある。
- 参画企業で、表 5-4(P68)、図 5-2(p70)、図 5-3(p71)の実施体制などに、京セラ株式会社が記載されているが、その成果報告が報告されていないのは、なぜか。
- 課題の多様性、重要性、参加企業数から考えて、資金が少ないように思われる。成果を普及する取り組みとして、プレス発表等が望まれる。

6. 総合評価

日本が1980年代から築き上げてきたセラミックス利用技術の研究が発展途上国などで活発になっている国際的状況下において、このような画期的とも言える接合技術が実用化しつつあることは、日本の産業の復活・再生にとって大変好ましいことであり、日本の製造業の競争力強化を図ると同時に、国内のセラミックス部品の製造企業にグローバル化に対応した事業のあり方を提示した点で、成果を上げている。

セラミックスの構造用部材への応用を妨げているのは、大型構造部材の製造の困難さが一因であり、高度な接合技術はそれを可能にする最短の方法である

国の支援により、セラミックス接合技術を中心としたプロジェクトが行われることは意義が大きく、もし、この時機を逃すと、日本全体でのセラミックス研究者の数、レベルの低下により、このような高度な技術革新は不可能だったと思われる。

本事業は開発製品がかなり絞られており、さらに今後の種々の部材開発に波及できる可能性があり、セラミックスを活用した様々な省エネ部材開発へと展開し、早期の製品化を大いに期待したい。

一方、補助事業は、実用化を目指したものであり、実用化のための問題点の抽出、大型化の問題点、さらに、ロードマップをより明確にし、市場動向を見据え、コスト計算、省エネ効果などを定量化し、費用対効果のある研究開発が必要である。

事業化を意識した効果的な特許の出願を、国内に留まらず積極的に進めていって欲しい。

また、中空ユニットの組み合わせによる球状容器の構成は興味ある開発であるが、繰返し使用される場合や局所的な損傷が生じた場合など、修復（ユニットの取替など）が容易にできる方法も合わせて開発しておく必要があると考えられる。

【肯定的意見】

- ・構造用セラミックスの研究開発は、日本が最も先導し続けてきた分野である。しかし、最近はその優位性が失われつつあり、中国を始めとする発展途上国における研究が活発になっている。近年、大きな技術革新がなく、それに伴って、研究者人口や、研究予算の縮小などが見られた。このような時機に、このような画期的とも言える接合技術が実用化しつつあることは、日本の産業の復活・再生にとって大変好ましいことである。
- ・セラミックスの構造用部材への応用を妨げているのは、大型構造部材の製造の困難さが一因であり、高度な接合技術はそれを可能にする最短の方法である。このような状況で、国の支援により、セラミックス接合技術を中心としたプロジェクトが行われることは意義が大きく、もし、この時機を逃すと、日本全体でのセラミックス研究者の数、レベルの低下により、このような高度な技術革新は不可能だったと思われる。
- ・事業の目的と進捗状況は妥当であり、目指すべき成果の早期の製品化を大いに期待したい。
- ・本事業は開発製品がかなり絞られており、さらにセラミックスを活用した様々な省エネ部材開発へと展開されることが望まれる。
- ・「革新的省エネセラミックス製造技術開発」事業は、日本が1980年代から築き上げてきたセラミックス利用技術を軸に、日本の製造業の競争力強化を図ると同時に、国内のセラミックス部品の製造企業にグローバル化に対応した事業のあり方を提示した点で、成果を上げている。
- ・ファインセラミックスの接合技術は、新規性があり、今後の種々の部材開発に波及できる可能性があり大いに期待できる。
- ・当該プロジェクトは、接合、ニアネットシェイプ、複雑形状、大型化、など極めて重要な基盤技術であり、セラミックス産業への波及効果も極めて大きい。優れたリーダーの下、優れた資質を有した企業参加による技術開発が行われている。

【問題点・改善すべき点】

- ・委託事業では、それぞれの研究機関の役割分担の明確化、問題点の抽出、開発の方針を明確にし、各個別の実施機関へ研究を特化させるようにしたのは、適切な方針と思われる。補助

事業では、実用化を目指したものであり、実用化のための問題点の抽出、大型化の問題点、さらに、ロードマップをより明確にし、市場動向を見据え、コスト計算、省エネ効果などを定量化し、費用対効果のある研究開発を行わなければならない。

- 事業化を意識した効果的な特許の出願を、国内に留まらず積極的に進めて行って欲しい。
- 本事業は、かなり実用化に絞った取り組みとなっているため、技術開発、実用化の観点から評価した。
- 中間評価時点では、出口イメージの製品プロトタイプの開発目標が実際には雲の中の山頂にあり、現在何合目まで登っているかは、頂上が見えてから結果的に定まるため、補助事業の評価は暫定的なものになっている。これは補助事業が成果を上げている時の宿命とみなすことができる。
- 中空ユニットの組み合わせによる球状容器の構成は興味ある開発であるが、繰り返し使用される場合、局所的な損傷が生じた場合、修復（ユニットの取替など）が容易にできる方法も合わせて開発しておく必要性があると考えられる。
- 当該技術を基礎・基盤技術として、科学的に実施する機関が必要では。

7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

- セラミックスは、基本的に脆性材料であり、実用化のためには破壊の確率的論的な解析による信頼性の確保が重要である。本プロジェクトでの成果は中間段階で接合の可能性を実証しているが、今後はより詳細に信頼性を向上するための接合体の破壊論による寿命予測、非破壊検査技術の向上まで含めた研究に発展させる必要がある。
- 早期の実用化にリソースをかける意義がある一方、セラミックスの大型化に伴う基盤技術開発の深化にも未だ多くのリソースが必要である。
- 本事業の研究実績をできるだけ公表することにより、研究分野として拡大することができれば、セラミックス産業のさらなる発展が期待される。
- 補助事業を担当した企業は、早めにショートサクセスとしての製品化を実現し、企業内での事業化に向けた態勢固めを強く図ると同時に、ショートサクセスとして製品化したセラミックス部材を早くユーザー企業に提出することで、産業間エネルギーネットワークを拡充する態勢固めを進め、日本の製造業の競争力強化につなげて行くことが望まれる。
- 公的な研究機関である産総研は、本事業の基盤研究成果を基に、セラミックス利用分野でのオープンイノベーション体制のハブとして、日本の製造業の技術力向上を支援してほしい。
- より効果的な波及効果が生み出されるよう特定の形状のみならず、用途や使い易さを考慮して、部材の組み合わせなどにより容器の形状も部分的に変えることが可能であったり、より耐食性と断熱性を同時に備えた部材などの開発も望まれる。

【各委員の提言】

- ・セラミックスの大型構造用部材を製造するためには、接合技術が必須であり、近年は、コンピューターによる複雑形状の部材でも、熱や歪みによる応力分布の解析が容易に行われるようになり、接合による構造部材の設計が可能になりつつある。しかし、セラミックスは、基本的に脆性材料であり、実用化のためには、破壊の確率的論的な解析による信頼性の確保が重要である。本プロジェクトでの成果は、中間段階で、接合の可能性を実証しているが、今後は、より詳細に信頼性を向上するための、接合体の破壊論による寿命予測、非破壊検査技術の向上まで含めた研究に発展させる必要があるのではないだろうか。
- ・平成 24 年度以降は共通基盤技術開発に相当する委託事業を収束とするとの運営方針である。早期の実用化にリソースをかける意義は理解できるが、一方、セラミックスの大型化に伴う基盤技術開発の深化にも未だ多くのリソースが必要であると考えている。この分野における世界的な CEO を目指した、産総研としての高いレベルでの研究開発の継続を期待したい。
- ・セラミックスの接合技術の研究は、以前に行われていたが、その困難さからか最近ではあまり見られない。本事業の研究実績をできるだけ公表することにより、研究分野として拡大することができれば、セラミックス産業のさらなる発展が期待される。
- ・補助事業を担当した企業は、早めにショートサクセスとしての製品化を実現し、企業内での事業化に向けた態勢固めを強く図ると同時に、ショートサクセスとして製品化したセラミックス部材を早くユーザー企業に提出することで、産業間連携を図ると、産業間エネルギーネットワークを拡充する態勢固めを図ることができる。こうした、オープンイノベーション体制を築くことが、日本の製造業の競争力強化になると思います。また、ショートサクセスとしてオープン化することで、いろいろな英知が集まり、大きな革新的なサクセスを築く可能性が高まると思います。
- ・公的な研究機関である産総研は、本事業の基盤研究成果を基に、セラミックス利用分野でのオープンイノベーション体制のハブとして、日本の製造業の技術力向上を支援してほしいと思います。
- ・接合技術による大型部材化技術は、新規性があり、セラミックス部材を使用する種々の分野での波及効果は大きいと考えられる。しかしながら、アルミ溶湯搬送容器の開発は、それはそれで重要と考えられるものの、波及効果は少ないように思われる。省エネの観点か

らみれば、もっと高温反応容器（例えば、鉄鋼での各種窯炉、ガラス工業での溶炉など）にも応用できるように、波及効果も配慮して開発を進められることを望む。それには、表面（容器内部に露出する面）は更に高温で更に過酷な条件下でも一層優れた耐食性を有する素材を検討し、また内部は断熱性の優れた構造にし、それを接合することにより、耐食性と断熱性の両特性に同時に優れた部材を製作し、その部材から構成される容器を製作といったことである。また部材の組合わせで球状のみならず、用途や使い易さを考慮して、部材の組合わせなどにより容器の形状も部分的に変えることが可能になるような開発も望まれる。素材は、SiC や Si₃N₄ (SINIC) のみならず、Al₂O₃, MgO, ZrO₂ などの高温酸化物などに関してあるいはそれらの組合わせた容器の開発にも足がかりとなるような、耐食性と断熱性を同時に優れた部材の開発も望まれる。

- ステレオファブリック造形は、今後のセラミックス製造技術において極めて重要な技術であり、基礎・基盤的な取り組みを継続的に行うべきである。
- 界面の取り扱いが極めて重要であるが、大型形状になった時の取り扱いに関し、小型とは異なる因子を挙げているが、より一層の基礎的課題と製品化を目指した課題の連携した取り組みが望まれる。
- 事業内容、参加企業数に対して、資金が少ないように思われる。セラミックスの競争力を維持、発展させるためにも、長期的な視野に立ったエンジニアリングセラミックスに対する支援が必要と思われる。

第4章 評点法による評点結果

第4章 評点法による評点結果

「革新的省エネセラミックス製造技術開発」に係るプロジェクト評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「3. 評点結果」のとおりである。

1. 趣 旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成11年度に評価を行った研究開発事業（39プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第9回評価部会（平成12年5月12日開催）において、評価手法としての評点法について、

(1) 数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、
(2) 個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

また、平成21年3月31日に改定された「経済産業省技術評価指針」においても、プロジェクト評価の実施に当たって、評点法の活用による評価の定量化を行うことが規定されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、
(1) 評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、
(2) プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、
を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

2. 評価方法

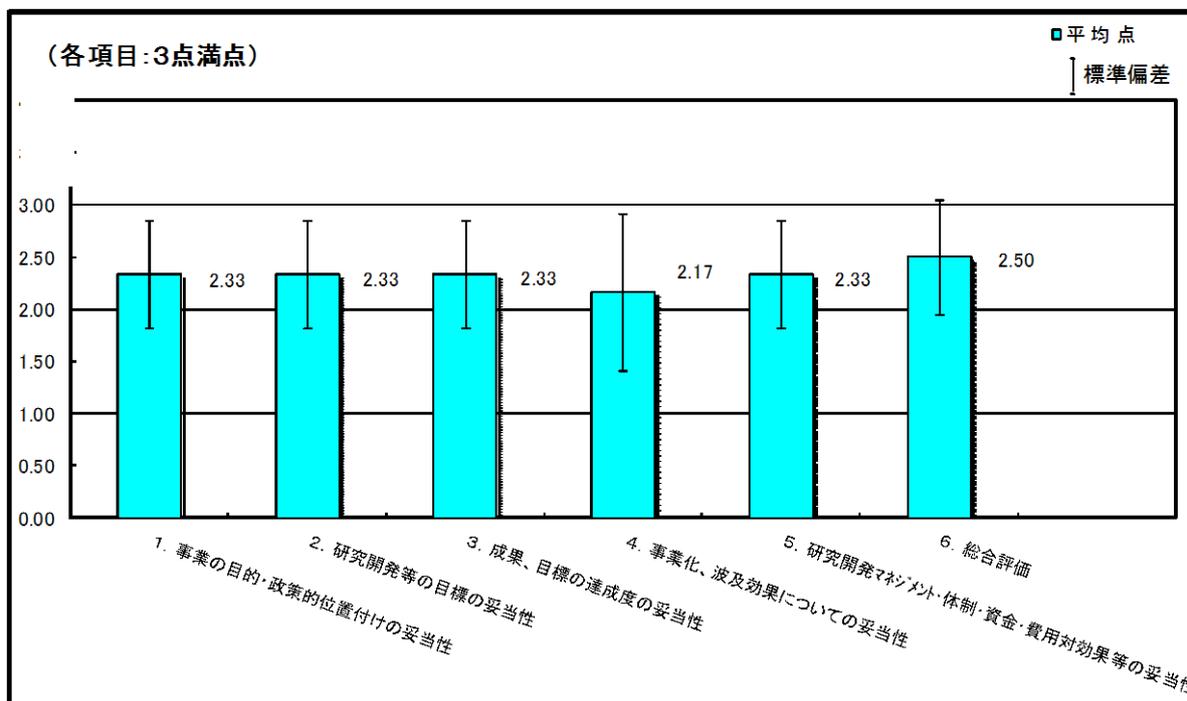
- ・各項目ごとに4段階（A（優）、B（良）、C（可）、D（不可）〈a, b, c, dも同様〉）で評価する。
- ・4段階はそれぞれ、 $A(a) = 3$ 点、 $B(b) = 2$ 点、 $C(c) = 1$ 点、 $D(d) = 0$ 点に該当する。
- ・評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に○を付ける。
- ・大項目（A, B, C, D）及び小項目（a, b, c, d）は、それぞれ別に評点を付ける。
- ・総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

3. 評点結果

評点法による評点結果

(革新的省エネセラミックス製造技術開発)

評価項目	平均点	標準偏差
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.33	0.52
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.33	0.52
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.33	0.52
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.17	0.75
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.33	0.52
6. 総合評価	2.50	0.55



革新的省エネセラミックス製造技術開発評価（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

提言	対処方針
<p>○セラミックスは、基本的に脆性材料であり、実用化のためには、破壊の確率的論的な解析による信頼性の確保が重要である。本プロジェクトでの成果は、中間段階で、接合の可能性を実証しているが、今後は、より詳細に信頼性を向上するための、接合体の破壊論による寿命予測、非破壊検査技術の向上まで含めた研究に発展させる必要がある。</p> <p>○早期の実用化にリソースをかける意義がある一方、セラミックスの大型化に伴う基盤技術開発の深化にも未だ多くのリソースが必要である。</p> <p>○本事業の研究実績をできるだけ公表することにより、研究分野として拡大することができれば、セラミックス産業のさらなる発展が期待される。</p>	<p>○ご指摘のとおりであり、信頼性確保のためには、①非破壊検査技術、②確率論に基づく解析、③破壊論、に④プロセス技術を加えた4つの項目につき、個々のレベルアップ（特に③④）だけでなく、前記4項目を応力解析とも関連付けながら、研究を進めることになる。実際には①④を連動させ、得られた試料の欠陥サイズや量、位置を確認しながら、それがどのような特性を示すのか③④に基づき評価を行っていく。</p> <p>○大型セラミックスは、今回ターゲットとした製造装置・システム用に加えて、地球規模で未利用エネルギー（太陽熱、地熱、あるいは産業廃熱）を有効に活用するためのツールとしてその重要性が増すと予測しており、これらの基盤技術としての大型化プロセスに継続して取り組む所存である。特に、マイクロ波やアーク、自己発熱を利用した省エネ型接合技術、並びに超大型部材化のための連続接合技術、そして上記に掲げた信頼性向上（非破壊検査等含む）、等が今後の課題と考えている。</p> <p>○ご指摘のとおり、特許出願や研究発表について、実績を公表したり nanotech や国際セラミックス総合展などの展示会で成果物を展示したりするなど、今後も広く本研究分野が拡大するよう努めてまいりたい。</p>

○補助事業を担当した企業は、早めにショートサクセスとしての製品化を実現し、企業内での事業化に向けた態勢固めを強く図ると同時に、ショートサクセスとして製品化したセラミックス部材を早くユーザー企業に提出することで、産業間エネルギーネットワークを拡充する態勢固めを進め、日本の製造業の競争力強化につなげて行くことが望まれる。

○より効果的な波及効果が生み出されるよう特定の形状のみならず、用途や使い易さを考慮して、部材の組み合わせなどにより容器の形状も部分的に変えることが可能であったり、より耐食性と断熱性を同時に優れた部材などの開発も望まれる。

○補助事業においては、実用化に向けて設計レビュー、モデル部材化、性能評価などを経て、設計レビューやユーザーニーズの反映を行っており、ユーザー企業と市場ニーズ、仕様等に関する情報交換を行いながらモデル部材の試作や、課題の早期抽出についてさらに重点的に推進してまいる。

○これまでに得た知見をベースに、他分野への波及を進め、一層の省エネ化と産業競争力の強化に資する開発へと発展させる所存である。まず、形状については、今回「限界」を示す意味で球体を選択したが、使い勝手や交換性、使用用途によっては他の形状、構造が有利な場合も想定される。それらを設計し、成果であるユニットのニアネット成形や接合技術を活用、発展させることは可能と考える。次に、過酷な条件で使用される各種反応容器用の材料開発の方向性としては、まず、今回の成果のひとつである耐食性・耐熱性に優れた酸化物の屈折率差を利用した高温熱反射技術については、各種の高温反応容器の断熱技術に展開できると考えている。