

分置

原子力用材料クロスオーバー研究第Ⅰ期計画
(平成元年度～5年度) 研究成果総合報告書

1994年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

原子力用材料クロスオーバー研究第Ⅰ期計画（平成元年度～5年度）
研究成果総合報告書

加納茂機* 館 義昭* 井上賢紀**
西田俊夫** 平川 康*** 吉田英一***

要 旨

（目的）平成元年度から開始した原子力用基盤材料研究（フロンティア材料研究）では、研究の効率的・効果的な推進のため、「クロスオーバー研究制度」により、産・学・官の相互交流型研究を行ってきた。5年度にて第Ⅰ期計画が終了したのに伴い、本報で、クロスオーバー研究の推進体制、研究交流活動および国内外調査の実績をまとめるとともに、動燃の研究成果の概要および6年度からの第Ⅱ期研究計画の概要を述べる。

（方法）クロスオーバー研究体制として、原子力基盤技術総合的研究推進委員会（委員長：藤家東工大教授）が組織され、その下部組織である原子力用材料研究交流委員会（主査：岡本東工大教授）に研究実施機関である動燃、原研、金材研、無機材研、物質研が参画し、研究計画、研究成果および研究交流方法等を審議した。動燃と原研は、幹事機関として、研究交流方法の企画・調整の役割を交互に果たした。

（結果）

- (1) 動燃は幹事機関として、原研と交互に、材料研究交流委員会を10回開催した。また、研究会8回、勉強会3回、国内シンポジウム2回、国際シンポジウム1回、仏・独・伊・蘭の5研究機関とのワークショップの開催および国内研究機関の訪問調査を行った。これらの研究交流を通じた、外部の専門家との交流、新素材に関する最新情報の収集、試料の入手、共同研究の遂行等は、動燃の研究テーマの効率的推進に大変役立った。
- (2) これらの研究交流により、動燃の研究テーマに関して以下のような成果を得た。
 - ① 新型セラミックス： 焼結法による既存の各種セラミックス（ Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC , SiC_3N_4 , Sialon等）を対象に550℃および650℃で最長4,000時間のNa中腐食特性を評価し、優先的に粒界の腐食が進行し、耐腐食性を向上させるためには粒界の組織・構造制御が不可欠であることを明らかにした。これらの成果を踏まえて新型セラミックス素材を試作・評価し、一部のセラミックスについて、耐食性に優れた新型セラミックス創製の見通しを得た。
 - ② 傾斜機能材： PSZ/SUS系FGMの各種物性値を組織および温度の関数として定式化し、高温度落差場及び高熱流束環境下における非定常・弾塑性解析を行った。高温度落差場においては遮蔽性重視型FGMが、高熱流束環境下においては熱伝達性能重視型FGMが熱応力緩和の点で有利であることを明らかにし、最適材料設計手法を確立した。MA/真空プラズマ焼結法、スラリー法等により円盤状および円筒状FGMの製造プロセスの予備的検討を行った。
 - ③ 高性能遮蔽材： 中性子遮蔽材用金属水素化物として高温安定性の評価を行い有望成分を選定するとともに、収納材料表面への水素バリアー材の被覆処理方法の検討を行い、カロライズ処理が優れていることを明らかにした。また、高速中性子遮蔽、熱中性子遮蔽、中性子と γ 線の同時遮蔽の必要な放射線環境を想定し、耐熱性の確保に留意して材料設計を行い、放射線の種類、強度、エネルギーに応じ、自在に遮蔽材の成分を変化させるため、粉末冶金法による一体成形プロセス条件の検討・最適化を行い、高性能遮蔽材創製の見通しを得た。
 - ④ 高性能制御材： B_4C /金属複合材、ホウ素化合物、 B_4C /SiCウイスキー等のペレット製造プロセス条件の最適化を行った。これらの試作材について熱伝導率、硬さ、熱衝撃特性の評価を行い、従来材の B_4C より耐割れ性が優れ長寿命な新型中性子吸収材創製の見通しを得た。
- (3) 6年度からの第Ⅱ期5ヶ年計画を中核5機関で立案し、材料研究交流委員会および科学技術庁関係者との調整を経た後、材料研究交流委員会および外部の評価者を含む社内の事前研究評価を受けた。その結果、研究目標、研究内容、研究スケジュールとも妥当との評価を受け、6年度からの研究の実施が認められた。

（結論）本クロスオーバー研究を通じて、一部の新素材について創製の見通しを得るとともに、関連する基盤技術を生み出すことができた。クロスオーバー研究制度が発足して以来、これまで5年間の研究交流の間には、研究機関間の性格の違い、研究環境・風土の違い、研究に対する興味・守備範囲の違い等乗り越え、研究の効率的・効果的推進のために、本制度は有効に作用したと思われる。なお、第Ⅰ期研究成果を内外の専門家と討論するため、第2回国際シンポジウムの開催が予定されている。

* 大洗工学センター 技術開発部 先進技術開発室
** 大洗工学センター 燃料材料開発部 燃料技術開発室
*** 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

April, 1994

Report of Phase I Program(1989~1993) on Nuclear Material Crossover Research

S. Kano , Y. Tachi , M. Inoue ,
T. Nishida , E. Yoshida , Y. Hirakawa

Abstract

(Purpose)

This report describes the outline, research results obtained, interchange activities, etc. of the Phase I Program on the Nuclear Material Crossover Research, which has been conducted by related research institutes including PNC/OEC from 1989 through 1993 fiscal year, and shows the Phase II Program to be started from 1994 fiscal year.

(Method)

Crossover research programs, research results and interchange methods were decided through discussions at the crossover research committee (chairman : Prof. M. Okamoto, TIT) in which PNC, JAERI, NRI, NIRM and NCLC were participated as main members.

Forums, seminars, symposiums and workshops with domestic and foreign experts on materials research were set up as the opportunities for interchange.

(Results)

(1) As secretary institutes, PNC and JAERI planned eight times of forums, 3 times of seminars, twice of domestic symposiums, once of international symposium, five workshops with research institutes in France, Germany, Italy and the Netherland. The contacts with outside experts, collection of new information on advanced materials, receipt of test samples, achievement of collaborative research, etc. through these interchanges were much valuable for effective performance of PNC research.

(2) The following results were obtained on PNC research.

The prospects on creation of following advanced materials were obtained through these interchanges: ① advanced ceramics having excellent corrosion resistance to sodium, ② longer life neutron absorbing materials having higher resistance to cracking than B₄C, ③ high performance shielding materials having higher heat resistance than conventional materials.

(3) Phase II Program to be started from 1994 fiscal year has been planned by main five institutes and authorized through the evaluation by two evaluation committees organized separately by the crossover research committee and PNC.

(Conclusion)

The prospects on creation of several advanced materials were obtained through the crossover research. Therefore, the crossover research were much valuable for effective performance of PNC research.

原子力用材料クロスオーバー研究第Ⅰ期計画（平成元年度～5年度）

研究成果総合報告書

目 次

1. はじめに	1
2. 原子力用材料クロスオーバー研究の推進体制	2
3. 原子力用材料クロスオーバー研究の概要	4
4. 動燃の研究内容と主な研究成果	6
4. 1 研究の目的および概要	6
4. 2 年次計画	7
4. 3 年次別の研究成果概要	8
4. 4 研究テーマ別の研究成果および考察	9
4. 5 公表成果	25
5. 研究交流活動および国内外調査等の成果	28
5. 1 原子力用材料研究交流委員会	29
5. 2 研究会および勉強会	31
5. 3 研究交流および研究協力	36
5. 4 国内シンポジウム	38
5. 5 国際シンポジウム	40
5. 6 国内調査	42
5. 7 海外調査	43
6. 第Ⅱ期原子力用材料クロスオーバー研究計画	46
6. 1 研究全体計画	46
6. 2 動燃の第Ⅱ期研究計画	54
7. まとめ	60
原子力用材料研究交流委員会名簿	62

原子力用材料クロスオーバー研究
研究成果総合報告書

図表リスト

表1.1	研究参画機関毎の研究分担課題	1
表5.1	各年度の研究交流関連活動	28
表5.2-1	研究交流委員会メンバー間の研究交流、協力	36
表5.2-2	研究交流委員会メンバー間の研究交流、協力	37
表5.3	第1回原子力極限環境材料シンポジウム概要	38
表5.4	第2回原子力極限環境材料シンポジウム概要	39
表5.5	国際シンポジウム概要	40
表5.6	訪問先および調査内容	42
表5.7	調査団メンバー	43
表5.8	海外調査日程表	44
表6.1	各研究項目の年次工程	48
表6.2	原子力用材料クロスオーバー研究における参画5機関の 研究分担の課題及び主要項目の比較表	50
表6.3	研究テーマおよびマスタースケジュール	57
表6.4	フロンティア材料研究の目的・適用箇所・関係機関	58
表6.5	クロスオーバー研究対象テーマの詳細研究工程	59
図2.1	研究実施体制と参画機関	2
図2.2	研究推進体制	3
図3.1	原子力基盤技術クロスオーバー研究の研究機関間分担関係	5
図6.1	複合環境用マルチコンポジットマテリアル(MCM)の開発の概念図	51
図6.2	複合環境用MCMの開発における主要研究開発項目及び 各研究機関の研究分担項目	52
図6.3	原子力用第Ⅱ期クロスオーバー研究の協力体制に関する概念図	53
図6.4	クロスオーバー研究第Ⅱ期計画の概念図および研究協力体制	56

1. はじめに

原子力用材料クロスオーバー研究課題「原子力極限環境材料の開発」は、金属系材料、セラミックス系材料、高分子・有機系材料および複合材料を対象に、照射下および化学的活性雰囲気における化学現象の解明と新材料創製を狙って平成元年度から平成5年度の5ヶ年で実施した。研究参画機関毎の研究分担課題を次に示す。

表1.1 研究参画機関毎の研究分担課題

金属材料技術研究所	原子力極限環境における材料化学に関する研究
無機材質研究所	原子力用セラミックスの腐食に関する研究
物質工学工業技術研究所	原子力極限環境下における高分子材料の劣化挙動の解明と探索
日本原子力研究所	極限環境用耐食合金の製造技術の開発
動力炉・核燃料開発事業団	耐ナトリウム性・耐放射線性新素材の開発

本書は、本研究の研究成果を中心に、研究交流、調査活動の結果をまとめたものである。

以下、第2章では研究推進体制、第3章で本研究の概要をまとめてある。第4章は参画5機関の研究内容や成果を詳細に述べている。第5章では、研究交流活動の記録と国内外調査による成果がまとめてある。第6章は平成6年度から予定されている第Ⅱ期クロスオーバー研究の計画を述べている。

2. 原子力用材料クロスオーバー研究の推進体制

原子力委員会が昭和62年に改訂した「原子力開発利用長期計画」では、原子力開発利用の基本目標のひとつとして、創造的・革新的科学技術の育成を掲げ、その一環として基盤技術開発の重点的推進が挙げられた。この中で、原子力用材料、原子力用人工知能、原子力用レーザー、放射線リスク評価・低減化の4技術領域について、非原子力分野を含む産・学・官の研究ポテンシャルを活用し、効率的・効果的に推進することになった。これを受けて原子力委員会に設置された基盤技術推進専門部会が4技術領域のそれぞれについて具体的課題を提案した。

同専門部会では、原子力基盤技術のうち研究機関の研究ポテンシャルの結集が必要であり、個々の研究機関では速やかに成果を得ることが困難な多岐にわたる技術要素から構成される研究を選び、原子力基盤技術総合的研究（原子力基盤クロスオーバー研究）と名付けた。

原子力用材料分野の原子力基盤クロスオーバー研究では、「原子力極限環境材料の開発に関する研究」が研究課題に選定され、図2.1の体制で実施することとなった。

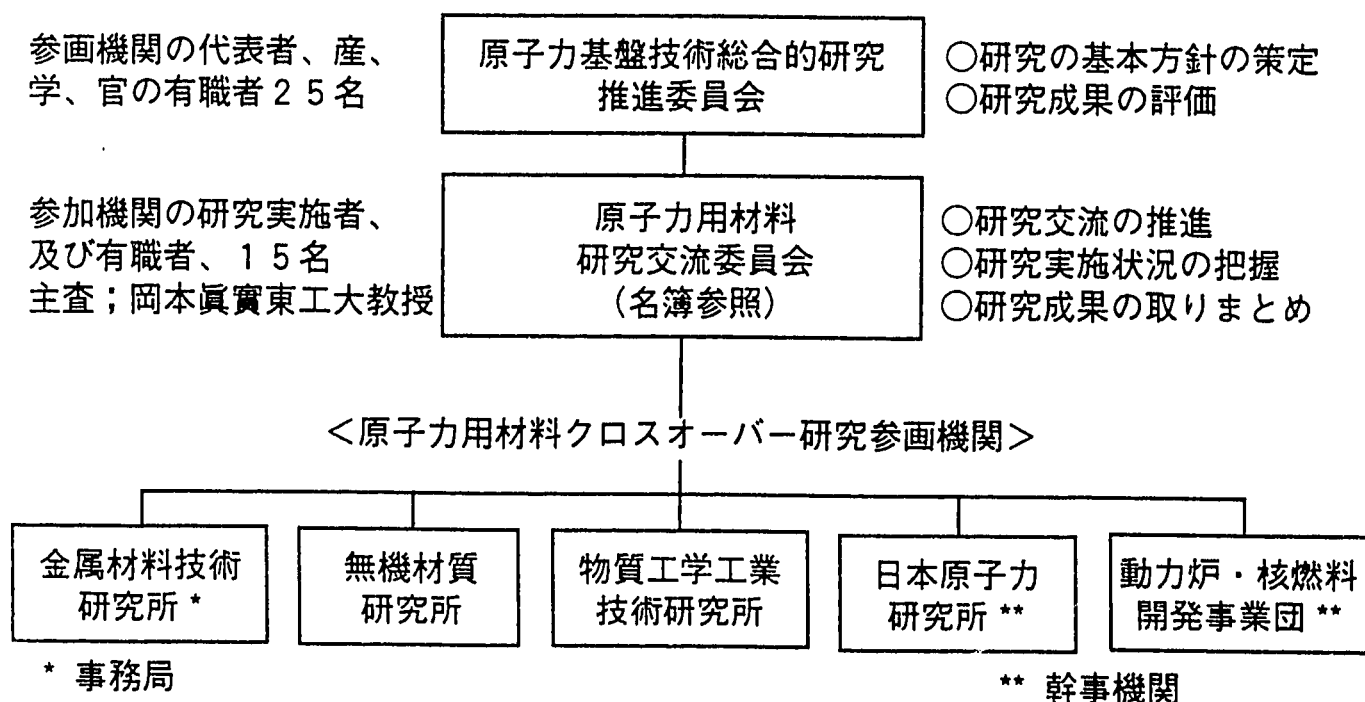


図 2.1 研究実施体制と参画機関

このように、本研究には5研究機関が参画しており、原子力基盤クロスオーバー研究として効果を上げるために、図2.2の研究推進体制がとられた。

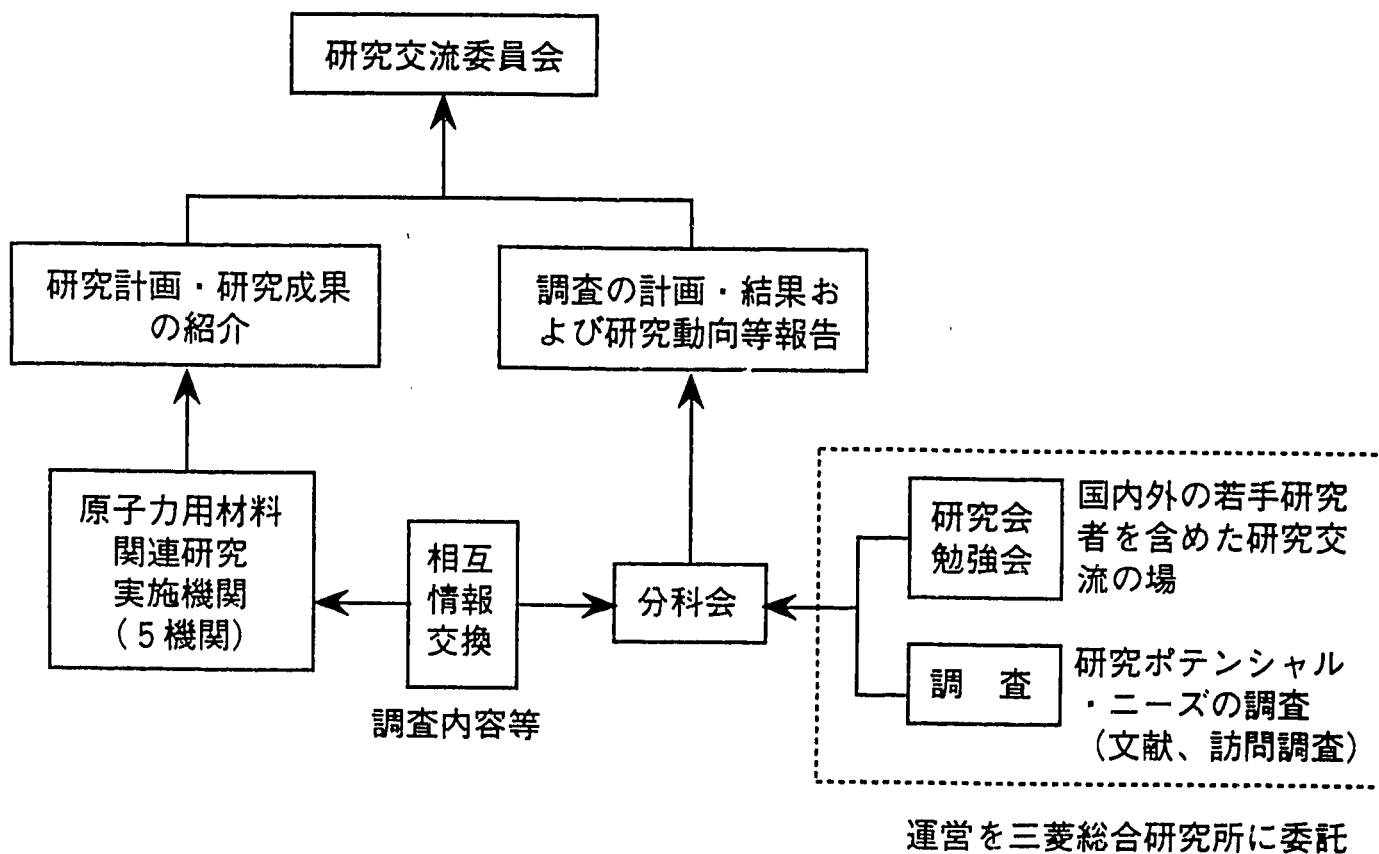


図 2.2 研究推進体制

3. 原子力用材料クロスオーバー研究の概要

(1) 研究目的

原子力複合極限環境における材料科学的な現象に関して、放射線照射下、化学腐食環境における材料試験と評価、放射線照射によって加速される化学反応・腐食現象の把握と機構の解明及び耐放射線腐食性に優れた新材料・新素材の設計・創製等に関する研究を共同で行った。

(2) 実施機関の研究分担項目

①金属材料技術研究所；「原子力極限環境における材料化学に関する研究」

照射下での材料表面反応現象、および格子乱れ過程を速度論的に解明するとともに照射表面での化学反応・物理化学特性変化の動的測定・解析のための技術基盤を得た。

②無機材質研究所；「原子力用セラミックスの腐食に関する研究」

液体金属ナトリウム中におけるセラミックス材料の腐食・劣化現象を、熱力学的及び反応速度論的観点から解明して、原子力用セラミックス材料の高性能化及び新たなセラミックス材料の開発の基盤を得た。

③物質工学工業技術研究所；「原子力極限環境下における高分子材料の劣化挙動の解明と探索」

放射線照射と化学的作用を受ける複合環境下における高分子材料の劣化現象の評価解析技術を確立して、新材料の探索及び設計指針に反映できる基盤知見を得た。

④日本原子力研究所；「極限環境用耐食合金の製造技術の開発」

原子力プラント特有の再処理硝酸や高温水環境等の放射性溶液環境における腐食現象の解析と耐放射線腐食性に優れた耐食合金の開発を行い、環境の酸化力のグレードに対応した三系統の耐硝酸性合金及び中低温重照射抵抗性合金をそれぞれ得た。

⑤動力炉・核燃料開発事業団；「耐ナトリウム性・耐放射線性新素材の開発」

高速炉の高温ナトリウム環境を対象とした耐放射線腐食性に優れた新素材、即ち新型セラミックス、傾斜機能材料（FGM）、高性能遮蔽材、高性能制御材を創製するための基盤材料技術を開発した。

図3.1に、各参画機関の研究分担関係を示す。

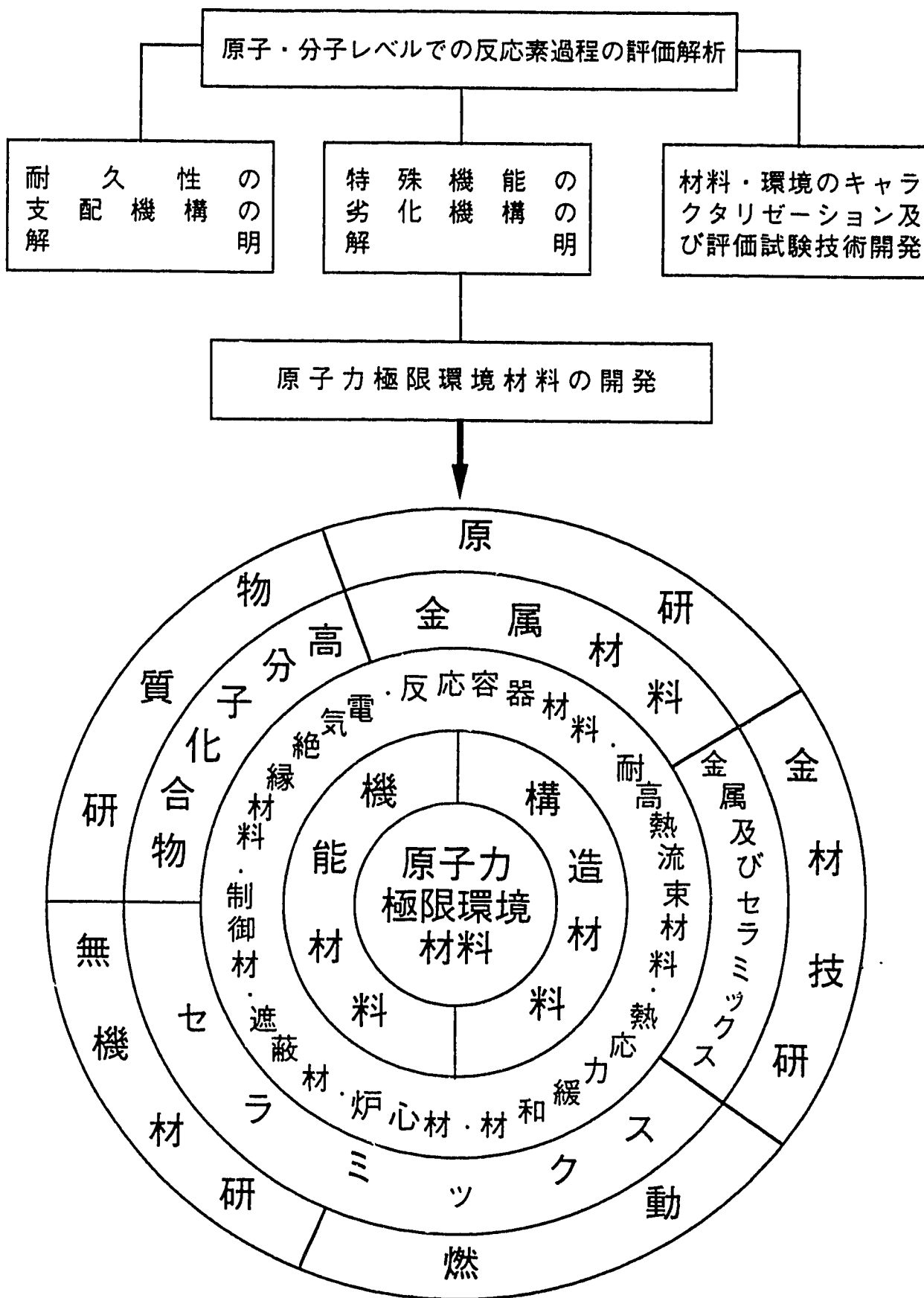


図 3.1 原子力基盤技術クロスオーバー研究の研究機関間分担関係

4. 動燃の研究内容と主な研究成果

研究課題	耐ナトリウム性・耐放射線性新素材の開発
------	---------------------

4. 1 研究の目的および概要

(1) 研究目的

高速炉の飛躍的高性能化を達成するため、高速炉環境に適用可能なA. 新型セラミックス、B. 傾斜機能材 (FGM)、C. 高性能遮蔽材、D. 高性能制御材を創製する。このため、これらの新素材の材料設計、製造プロセス開発、試作材の特性評価を行う。以下に、①研究目標②研究対象材料および③研究課題を示す。

- A—①高温化 (530℃→650℃以上) ②セラミックス (Si_3N_4 , SiC , ZrO_2 , Al_2O_3 , AlN , サイロン等) ③Na及び中性子による劣化・損傷・破壊メカニズムの解明、既存セラミックスの改良方策の探索、新型セラミックスの材料設計
- B—①熱応力緩和、超長寿命炉心材、高温化 (2年→10年以上、675℃→750℃以上) ②セラミックス/金属FGM、金属/金属FGM ③熱応力解析、材料設計、製造プロセス開発、Na及び中性子による劣化・損傷・破壊メカニズムの解明
- C—①軽量・コンパクト化 (板厚半減)、耐熱性向上、高性能・万能遮蔽材②金属水素化物及び各種成分複合材 ③材料設計、製造プロセス開発、金属水素化物の化学的安定性、耐熱性、遮蔽特性の評価、水素バリア材被覆処理法の開発
- D—①耐割れ性向上・長寿命化 (1年→4年以上) ② B_4C /金属複合材、新型制御材 ③材料設計、製造プロセス開発、熱伝導率・耐熱衝撃、耐割れ性の評価、中性子による劣化・損傷メカニズムの解明

(2) 研究の視点および経緯

高速炉の飛躍的高性能化を達成するには、既存の材料では限界があるため、原子力極限環境に最適な新素材の創製・適用が最も重要な解決方策である。セラミックスは軽量かつ耐熱性等に優れており、高速炉でこれらの特徴を生かすためにはNa環境で耐食性が優れていることが不可欠である。そのため、既存のセラミックスのNaによる腐食の機構を解明することにより、新型セラミックスの材料設計・創製を進めた。FGMは近年我が国で生まれた新しい概念の新素材であり、異なる成分を板厚方向に傾斜させることにより、熱応力の発生を大幅に抑制することが期待できる。そのため、材料設計手法および製造プロセスの検討を行った。これまでの放射線遮蔽材は耐熱性および種々の放射線環境への適用性が乏しいという課題があった。そのため、耐熱性を有し、かつ粉末冶金法を活用することにより放射線環境により自在に成分を変えられる複合遮蔽材の開発を進めた。

(3) 研究交流

- 共通—材料研究交流委員会10回、研究会8回、勉強会3回、国内シンポジウム2回、国際シンポジウム1回、海外の5研究機関とのワークショップ開催、訪問調査を行い、内外の専門家と研究交流。
- A—無機材研、東北大、名大と共同研究。素材メカ9社より試料提供。ファインセラミックスセンターに解析依頼。仏との情報交換 (予定)。
- B—FGM研究会に参画し、材料設計を担当・FGM情報交換。東北大と共同研究。客員研究員 (東北大2名) 招へいし研究交流。製造プロセス開発で素材メカと交流。
- C—製造プロセス開発で素材メカと交流。独及び原研より金属水素化物サンプル・情報入手。
- D—製造プロセス開発で素材メカと交流。仏と情報交換。

4. 2 年次計画

研究項目	平成元年度	平成2年度	平成3年度	平成4年度	平成5年度
A. 高速炉用新型セラミックス	従来材		新型材 (I)		新型材 (II)
1. 試験片製作	1000h	4000h	1000h	4000h	1000h
2. Na中腐食試験					
3. 腐食解析					
4. セラミックス改良方策探索					
5. 強度評価試験技術の確立のための検討		試験装置整備		試験技術検討	強度評価
6. 中性子照射試験			照射準備	照射試験	冷却取出
B. 高速炉用傾斜機能材	FINAS の改良	平板の解析	三次元構造体の解析		
1. 材料設計手法の検討 (FINAS による解析)		MA/HIP法による試作		MA プラスマ焼結法による試作	
2. 製造プロセスの検討				スラリー法による試作	
3. 試作材の特性評価					
C. 高性能遮蔽材	材料選定	金属水素化物		水素バリア材の開発	
1. 金属水素化物	化学的安定性評価	製造プロセス検討	(マイクロキャセル機能・被覆処理技術の開発)		
2. 複合遮蔽材	材料成分設計	「むつ」材の調査	インターアトムより情報入手		
3. 総合評価		製造プロセスの開発	試作材の特性評価		
D. 高性能制御材	材料選定	ホットプレス法による試作			
1. 製造プロセスの検討		組織・構造、成分分析	熱伝導率、耐熱衝撃性		
2. 試作材の特性評価			照射準備	照射試験	
3. 中性子照射試験					
4. 適用性評価					
5. 炉外特性総合評価					

新型セラミックス	<p>な高速加工用新型セラミックス創製のための研究のきっかけとして、既存セラミックスのNaに対する腐食特性とその機構の解明を通じた既存セラミックスの耐食性改良方策の探索のため、既存のSi₃N₄, SiC, ZrO₂, Al₂O₃, サイアロン等について、550℃&650℃, 1000時間のNa中浸漬試験を行った。</p>	<p>650℃, 4000時間のNa中浸漬試験、腐食特性の評価、腐食機構の解明、既存セラミックスの耐食性改良方策の探索を行った。その結果、いずれのセラミックスにおいても粒界腐食が支配的に生ずることが明らかとなった。また、Al₂O₃については、純度の高いものほど腐食量は小さくなること、Si系セラミックスは、他のセラミックスより温度依存性および時間依存性が著しいことが明らかとなった。</p>	<p>めの改良方策を明らかにし、粒界の組織・構造を制御した新型セラミックスを試作し、550℃&650℃, 1000時間のNa中浸漬試験を行った。また、焼結助剤として使用されるMgO, Y₂O₃, CaO, AlNおよびMgAl₂O₄, Y₃Al₅O₁₂, BN, TiCについても同条件のNa中浸漬試験を行い、高純度であればそれらはNaに対する耐食性が優れていることを明らかにした。</p>	<p>時間のNa中浸漬試験を行うとともに、浸漬材の腐食特性、機構の解明を行い、耐食性向上の度合いを調べた。その結果、Al₂O₃は、Si不純物の除去による高純度化を行えば、Na環境中で適用性があることが明らかになった。また、強度試験技術を確立のための検討を行うとともに、中性子照射試験を開始した。</p>	<p>Si系セラミックスに腐食量のバラツキはたもの、更なる改があることが明らかそのため、粒界の制御、SiO₂不純物除去ン注入等により表面2次の新型セラミッし、Na中試験を開始、中性子照射試験を継もに、強度試験を開</p>
傾斜機能材	<p>B. 熱応力緩和機能を期待するFGMを創製するためには、熱応力・変形を最小にする傾斜組成とその分布を得るための最適材料設計手法の確立が不可欠である。そのため、動燃が開発した熱応力・変形解析用プログラム"FINAS"を、成分の混合比により異なる各種物性値を位置の関数として組み込めるよう改良し、FGMの熱応力・変形解析を可能とした。</p>	<p>PSZ/SUS系FGMの高温度落差場平板モデルの3D非定常・弾性熱応力・変形解析(2000K-1000K)により、熱応力・変形分布の成分傾斜依存性を解明し、熱応力・変形を最小にするためには最適成分傾斜が存在することを明らかにした。またメカニカルアロイ法(MA)による製造プロセスを調査検討した。</p>	<p>PSZ/SUS系FGMの高熱流束環境3D弾・塑性熱応力・変形解析を行い、3D構造体の高熱流束環境下で得られた試験結果により検証した。その結果、NFGM層の凹凸及び亀裂の発生を解析で予測できることを明らかにした。また、MA/HIP及びMA/チタ放電焼結法による製造プロセスの検討を行い、割れの発生防止のため加工改良の必要性を明らかにした。</p>	<p>"FINAS"による最適材料設計手法の確立を行った。円盤状Al₂O₃/SUS, Si₃N₄/SUS系FGMに関しては、チタ放電焼結法により、製造プロセスの検討を行い、割れの発生防止のためには、粉末混合比および板厚分布を再検討する必要があることが明らかとなった。さらに、管状Mo/SUS系FGMに関して、スリッ法による製造プロセス条件の調査検討を開始した。</p>	<p>Al₂O₃/SUS, Si₃N₄/SUSチタ放電焼結法による最適条件を調べると作したAl₂O₃/SUSの機械的特性、熱疲労た。Si₃N₄/SUSでは生し改良の余地があらかとなった。またよりMo/SUSおよびTiの最適加工条件を調</p>
高性能遮蔽材	<p>C. 12種の金属水素化物の核断面積・高温相安定性・水素密度等物性値の評価を行い、有望成分(Zr, Ti, Gd, Hf, Y)を選定した。複合材については、遮蔽計算コードにより熱中性子、高速中性子及び中性子とγ線の複合環境各々に有用な成分の選定をおこなった。</p>	<p>金属水素化物の製造プロセスを直接水素化、接着剤による固化法、延性金属によるメッキ処理法により検討し、粒状化及び真密度化の点で課題が生じ、3方法とも適用性がないことが明らかとなった。また、複合材料のプレス成形による製造プロセスを検討し、最適条件(バインダーの選定・混合条件・温度・荷重・保持時間等)を明らかにした。</p>	<p>金属水素化物の製造プロセス改良のため、金属水素化物粉末を水素難透過性の超微粉によりマイクロキャプセル化する方法を調査検討した。また、金属水素化物収納容器を通した水素の透過を防止するため、収納容器に水素難透過性表面処理を施す方法を検討した。また、試作した複合材の高温安定性・密度・曲げ強度・硬さ等の評価を行い、有望材創製の見通しを得た。</p>	<p>金属水素化物のマイクロキャプセル法及び水素難透過性材料(バリアー材)の製造プロセスの開発及び試作材の基本特性・高温安定性・水素透過性・強度等の評価を行った。その結果、バリアー材処理法に改善の必要があることが明らかとなった。また、試作した複合材の遮蔽試験を行い、計算値とほぼ一致することが明らかとなった。</p>	<p>水素化カルコウム粉末と粉末をHIPで直接固し、水素保持機能のた。収納材料への水として、加ライ処理法最適処理条件の選定透過抑制機構の検討その結果、加ライ処理法バリアー材処理法としてことが明らかとなっ</p>
高性能制御材	<p>D. B₄C/Ni, B₄C/Zrについて、ホットプレス法によるペレット製造プロセス条件(原料の選定・混合比・混合条件・温度・荷重・保持時間等)の最適化を行った。B₄C/Niにおいて、Ni混合比が40vol%以下では、生成するNi₃B₆が低融点なため溶融物が黒鉛モールドより溶出した。B₄C/Zrでは研究対象としたすべての混合比で仕様を満足するペレットが得られた。</p>	<p>B₄C/Mo, B₄C/Cu-Ni, B₄C/SiCウイスキー, EuB₆, SiB₆について、ホットプレス法による製造プロセス条件の最適化を行った。B₄C/Cu-NiではCuの溶融を避けるため焼結温度を精密に制御すること、B₄C/SiCウイスキーではウイスキーが混合中に粉砕するため乾式法から湿式法への変更の必要性が明らかとなった。EuB₆では結晶粒の粗大化を抑制するため原料粉の微細化を図った。SiB₆では原料粉の微細化とBNモールドへの変更により破壊と接着を防止した。</p>	<p>TiB₂, B₄C/SiCウイスキーについて、ホットプレス法によるプロセス条件の最適化を行った。B₄C/SiCウイスキーについてはアスペクト比の小さいウイスキーへの変更と湿式混合法の採用により健全なペレットを得た。また、これまでの8種の試作材について高温安定性・密度・X線回折・硬さ・熱伝導率・熱衝撃特性のを行い、B₄Cより耐割れ性に優れた有望材創製の見通しを得た。</p>	<p>これまでの研究で創製の見通しを得た新型中性子吸収材の炉心での制御材としての核的適用性を評価し、特に「もんじゅ」用取り換え制御材としての適用性が高いことを明らかにした。また、制御材として最終的に不可欠な中性子照射特性を評価するため有望材の中性子照射試験を開始した。</p>	<p>中性子照射試験を継</p>
特徴及び意義	<p>A. 既存セラミックスのNa中浸漬試験開始 B. 最適材料設計手法検討開始・FINASの改良</p>	<p>A. 既存セラミックスのNaに対する腐食挙動機構の解明 B. 高温度落差場平板モデルの熱応力・変形解析・製造プロセス検討開始</p>	<p>A. 既存セラミックスの耐食性改良方策の探索・新型材の試作・Na中試験 B. 高熱流束環境構造体の熱応力・変形解析・製造プロセス開発・課題抽出</p>	<p>A. 新型材のNaに対する耐食性改善効果の評価・改良方策の探索・照射試験開始 B. 最適設計手法確立・製造プロセス開発・課題抽出</p>	<p>A. 第2次新型材の試験・照射試験開始 B. 製造プロセス開発・</p>

4. 4 研究テーマ別の研究成果および考察

4. 4. 1 市販セラミックスのNaによる腐食特性（重量変化）

(1)表1に示すような種々の市販の焼結法によるセラミックス、CVD法により作製されたセラミックスならびに単結晶を対象に、550℃および650℃、1000時間（最長4000時間）のNa中腐食試験を実施し、Naに対する耐食性を評価した。

(2)各セラミックスについて、腐食量の測定を行った結果を図1および図2に示す。単結晶やCVD材に比べ、焼結セラミックスの腐食量が非常に大きいこと、腐食量の温度および時間依存性は酸化物系セラミックスよりも非酸化物系Siセラミックスの方が顕著であることを明らかにした。また、ほとんどの材質のものが腐食試験により重量損失を示したのに対して、ZrO₂は重量増加になった。

(3)スピネル（MgAl₂O₄）やYAG（Y₃Al₅O₁₂）、さらに助剤として用いられるMgO、Y₂O₃、AlNは良好な耐食性を示したのに対して、TiCやBNは耐食性に劣った。特にTiC、BNは単結晶やCVD材の腐食量も大きく材質そのものがNaに対する耐食性に劣ることが明らかになった。

表1 セラミックス試験片一覧
Tested ceramics

	Sintered		CVD	Single Crystal
	Existing	Advanced		
Engineering Ceramics	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiC	Al ₂ O ₃
	ZrO ₂			ZrO ₂
	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄		SiC
	SiC	SiC		
	Sialon	Sialon		
	AlN			
Additives	MgO			MgO
	Y ₂ O ₃			
	CaO			
Others	MgAl ₂ O ₄		TiC BN	MgAl ₂ O ₄
	Y ₃ Al ₅ O ₁₂			Y ₃ Al ₅ O ₁₂
	TiC			TiC
	BN			
	AlON			

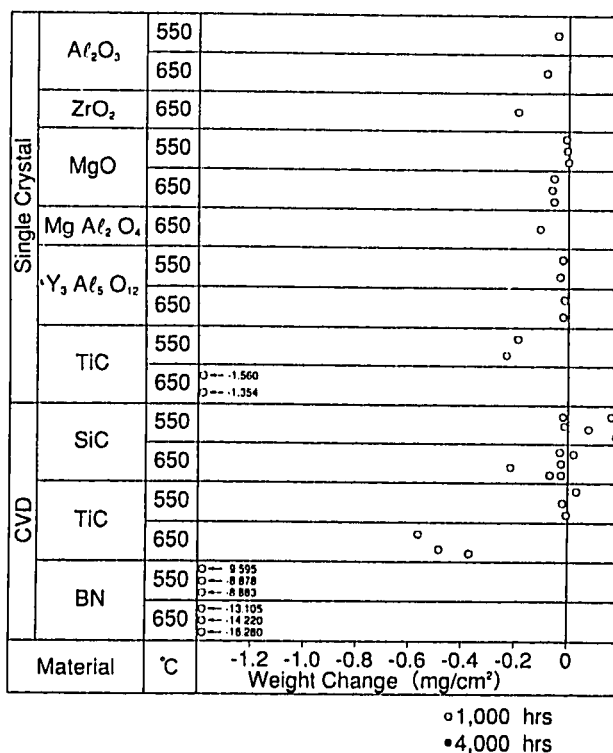


図1 CVDセラミックスおよび単結晶の重量変化

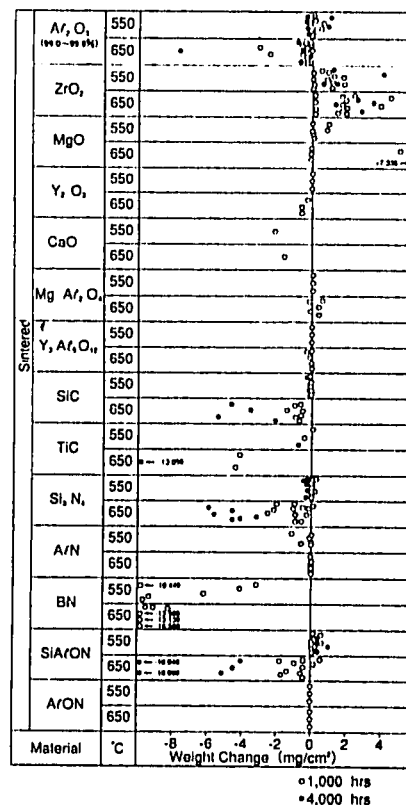


図2 焼結法セラミックスの重量変化

4. 4. 2 市販セラミックスのNaによる腐食特性 (マイクロ解析結果)

(1)各焼結セラミックスにおいては、Na接液面から深さ方向に変色層が生じており、その厚みはEPMA分析により検出したNaの侵入深さと一致した。表1に各セラミックスの変色層の厚みを、図1にZrO₂およびSi₃N₄に対するEPMA線分析の結果を示す。

(2)純度の異なる(92~99.9%)のAl₂O₃に対して、Na腐食に対する純度の影響を評価した。その結果、高純度のAl₂O₃ほど良好なNaに対する耐食性を示し、95%以下では粒界アタックやこれによる割れが発生した。単結晶Al₂O₃を用いた評価試験からは、Al₂O₃単体は良好な耐食性を示していることから、低純度の焼結Al₂O₃の場合は、粒界に存在する不純物が耐食性に関与していることを明らかにした。さらに、Al₂O₃中の不純物の大半はSiであることから、粒界相はSi-O化合物が主成分であることを明らかにした。図2に、Na腐食による重量損失と不純物Siの量との関係を示す。腐食量は不純物Siの量に明確に依存しているのが分かる。

(3)ZrO₂の腐食試験後の重量増加は、内部へのNaの侵入と表面上の腐食生成物(Na₂ZrO₃)の沈着の影響であることが明らかになった。一方、ZrO₂の単結晶は優れた耐食性を示した。また、安定化剤のMgOとY₂O₃の間には腐食特性に対する顕著な差異がないことがわかった。

(4)図3に示すとおり、非酸化物系Siセラミックス(SiC, Si₃N₄, Sialon)については、Na接液面近傍において、選択的な粒界腐食を示した。また、焼結セラミックス、CVDセラミックス、単結晶それぞれの腐食量の比較から、Naによる腐食損失のほとんどは粒界腐食によるものであることを明らかにした。

表1 焼結セラミックスの変色深さ

	at 650°C (μm)	
	1000h Sodium Exposed	4000h Sodium Exposed
Al ₂ O ₃	Trace	200
ZrO ₂	40	400
SiC	Trace	50
Si ₃ N ₄	80	300
SIALON	10	50

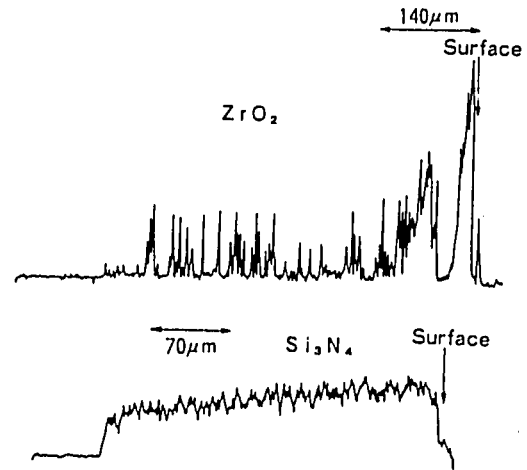


図1 EPMAによる深さ方向のNaの分析結果

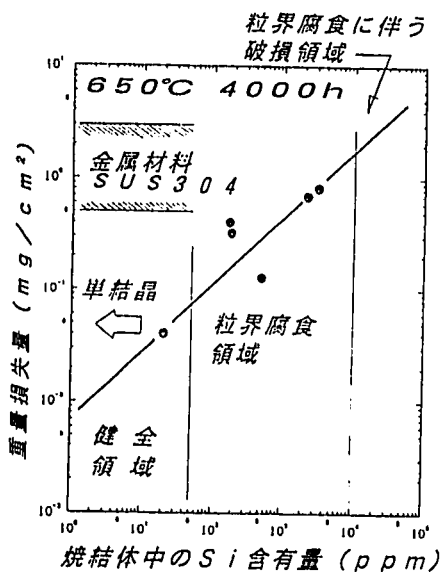


図2 重量損失と不純物Siの量との関係

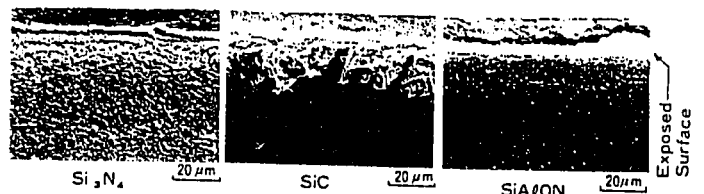


図3 Na接液面近傍のSEM観察結果

4. 4. 3 セラミックスのNaによる腐食機構の解明および耐食性改善方策の探索

(1)酸化物系セラミックス Al_2O_3 の場合：TEM/EDS観察等の結果、以下が明らかになった。

- ①Na浸漬材において、Naは粒界だけから検出され、結晶粒内からは検出されなかった。
- ②粒界からはSi, Mg, Ca, Alが検出されたが、これらのうち、Mgは緻密化促進剤としてMgOの形で添加されたものであり、Si, Caは不純物である。これらは全て酸化物の形態で存在していると考えられ、その構造はガラス相である。

以上のことから、 Al_2O_3 のNaによる腐食は粒界腐食が支配的であり、その原因は粒界におけるSi-O化合物を主成分としたガラス相の存在である。Na腐食による重量損失はこのSi-O化合物と環境中のNaとの反応 (Na_2SiO_3 の生成反応) によって粒界相成分がNa中に溶出するために起こることが推察される。

(2)非酸化物系SiセラミックスSiC, Si_3N_4 , Sialonの場合：図1に示すTEM/EDS観察等の結果、以下が明らかになった。

- ①Na浸漬材において、Naは粒界だけから検出され、結晶粒内からは検出されなかった。
- ②粒界からはSi, Y, Alが検出され、これらのうち、Y, Alは焼結助剤として酸化物の形で添加されたものである。これらは複合酸化物の形態で存在していると考えられ、その構造はガラス相である。
- ③部分的に結晶化している粒界からはNaは検出されなかった。

以上により、Si系セラミックスのNaによる腐食も Al_2O_3 同様粒界腐食が支配的であり、その原因は原料粉末の酸化や焼結助剤と母相成分によって焼結過程において生成された、粒界相中のSi-O化合物がNaと反応する (Na_2SiO_3 の生成反応) ためであると考えられる。大きな重量損失はこの反応に伴って粒界相成分のNa中への溶出や粒界の脆弱化による結晶粒の脱落のために起こると推察される。

図2に上述したNaによる腐食機構の概念図を示す。

したがって、耐食性改善のためには粒界の組織・構造を制御し、粒界腐食を抑制することが重要である。

- ・粒界相の結晶化
- ・粒界相体積の低減化
- ・Naに対して安定な助剤の選択
- ・Si-O化合物の生成抑制
- ・原料粉末の高純度化 (特に SiO_2 の排除)

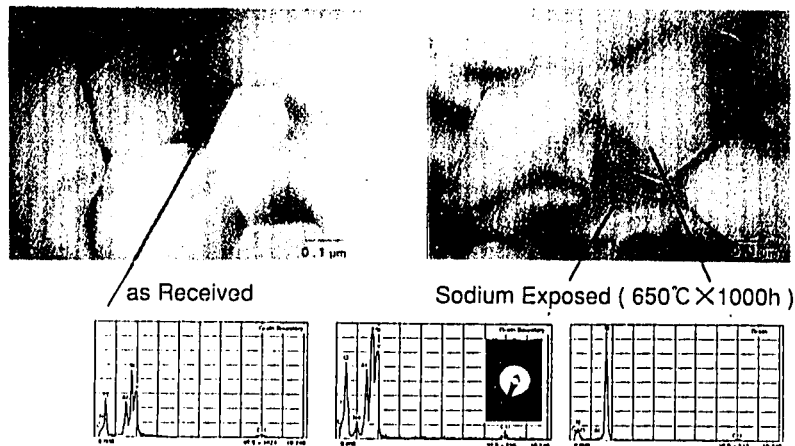


図1 Si_3N_4 のTEMおよびEDS分析結果

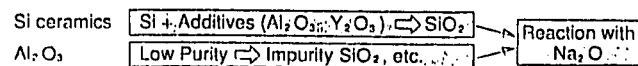
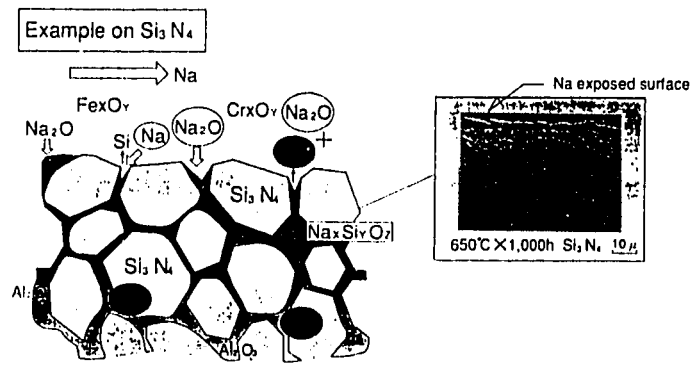


図2 Naによる腐食機構の概念図

4. 4. 4 新型セラミックスの試作および改良の効果の評価

(1) Al_2O_3 と強度特性に優れるSi系セラミックス3種 (SiC , Si_3N_4 , Sialon) の計4材質について、前述の結果を基に下記に記す様な粒界を制御した新型セラミックスを試作した。

- Al_2O_3 . . . 4N Al_2O_3 焼結体 (焼結体の高純度化)
- SiC . . . Al_2O_3 助剤 SiC (Na に対して安定な焼結助剤の選択)
- Si_3N_4 . . . 粒界結晶化 Si_3N_4 (粒界相の結晶化)
- Sialon . . . 粒界相体積低減 Sialon (粒界相体積の低減化)

(2) 新型セラミックス (Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , Sialon) に対して、 $550^\circ C$ および $650^\circ C$ 、1000~4000時間のNa中腐食試験を実施し、改良の効果の評価した。

(3) 図1に示すように高純度化した Al_2O_3 は腐食量が市販材に比べて非常に小さくなり、さらに粒界腐食の様相、内部へのNaの侵入は認められず、改良は非常に有効であった。

(4) 図2および図3に示すように、Si系セラミックスは全体的に非常に再現性の良いデータが得られ、 Si_3N_4 と Sialon は粒界腐食は抑制できたが、重量損失が市販材と同程度と大きかった。また、 SiC においては重量損失が市販材と同程度と大きかったのと同時に、粒界腐食も起こった。このように、Si系セラミックスの改良はまだ不十分であり、更なる改良の必要性が明らかになった。

(5) このSi系セラミックスにおける重量損失ならびに粒界腐食の原因としては、原料粉末時に混入あるいは焼結過程に生成した SiO_2 が主に粒界に存在していること、材質そのものがNaに対する耐食性に劣ること等が考えられる。したがって、Si系セラミックスの耐食性改善のためには、前述のような粒界相の制御と同時に SiO_2 の生成抑制および排除、または材料表面そのものの改良・改質が必要不可欠であると考えられる。

(6) Si系セラミックスの耐食性改善のため、新たに下記に示す様な第2次新型セラミックスおよび表面改質セラミックスの試作を現在進めている。

① 第2次新型セラミックス

- SiC : B_4C 助剤 SiC
 Al_2O_3 助剤・脱 SiO_2 SiC
- Si_3N_4 : 粒界相結晶化・ SiO_2 低減 Si_3N_4
ナノコンポジット材
- Sialon: Sialon- Si_3N_4 複合材 (ゾルゲル合成)
粒界相低減・低Z値 Sialon

② 表面改質セラミックス

- Mo/Feイオン注入 SiC
- Mo/Feイオン注入 Si_3N_4
- Mo/Feイオンビームミキシング SiC
- Mo/Feイオンビームミキシング Si_3N_4

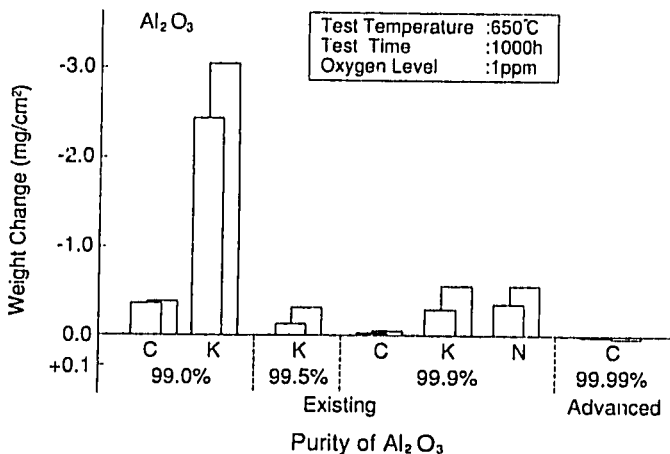


図1 市販および新型 Al_2O_3 の腐食量の比較

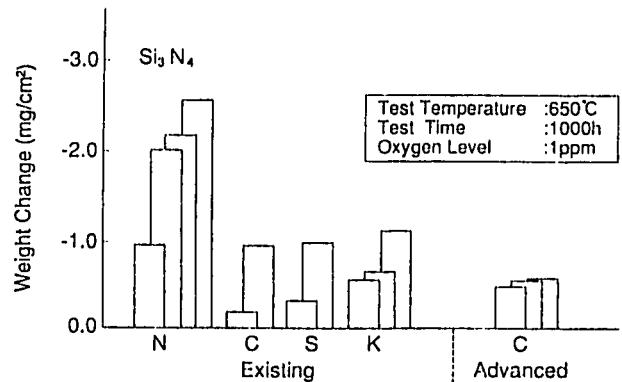


図2 市販および新型 Si_3N_4 の腐食量の比較

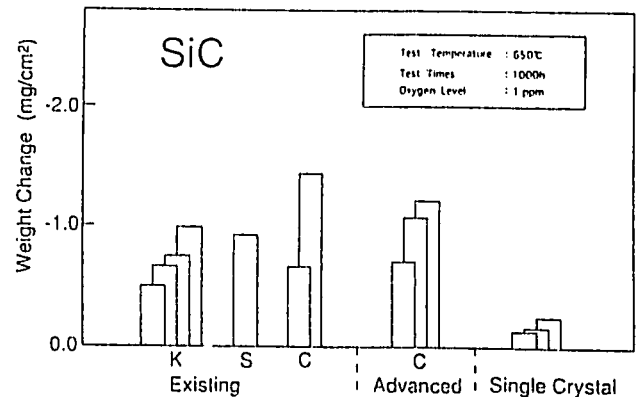


図3 市販および新型 SiC の腐食量の比較

4. 4. 5 傾斜機能材の熱応力・熱伝導解析手法の確立

(1)FGMは板厚方向に成分が傾斜するため、熱応力解析に必要となる各位置の物性値が異なる。このため動燃開発の汎用有限要素解析コード「FINAS」を、成分組成に依存した物性値が扱えるように改造し、FGMの熱応力・熱伝導解析を可能とした。

(2)無傾斜機能材料 (NFGM) の物性データを基に、PSZ/SUS系FGMの各種物性値を組成及び温度の関数として定式化した。図1に計算に使用したFGM板厚方向での位置と組成との関係を示す。図2に示す簡易平板状FGMの $\Delta T=1000\text{K}$ の高温度落差場における非定常弾性解析を実施した。その結果、高温度落差場においては、熱遮蔽性重視型FGMが熱応力緩和の点で有利であることが明らかになった。

(3)解析手法確立のため、航技研(NAL)での高熱流束環境での実験を想定して熱伝導・熱応力解析を行った。解析に用いたモデルを図3に示す。このモデル (基本要素モデル) は実試験材の一部分をモデル化したものである。その結果、高熱流束環境下においては熱伝達性能重視型FGMが熱応力緩和の点で有利であることが明らかになった。

(4)さらに、実際の試験体に近づけるため、図4に示す実寸形状モデルで熱伝導・熱応力解析を行った。高熱流束環境下におけるFGMの熱応力解析は、実試験の温度測定結果 (表面温度分布) に比例するように入熱分布を決めることでより、正確な熱応力解析が可能であることを明らかにした。

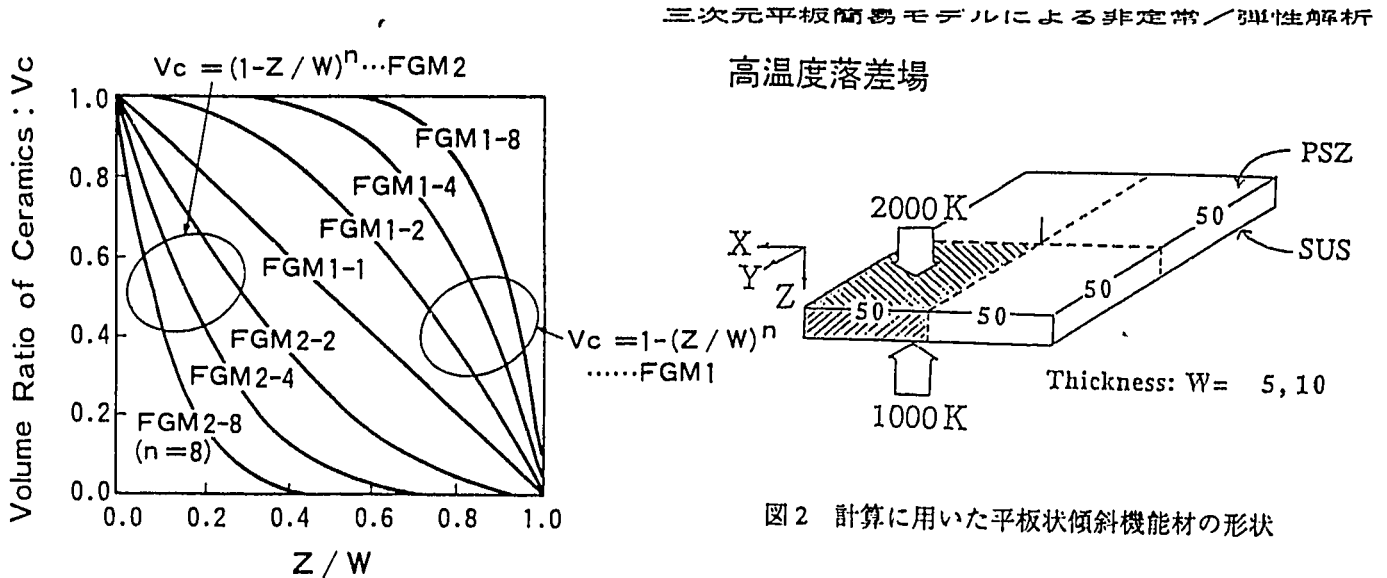


図2 計算に用いた平板状傾斜機能材の形状

図1 計算に用いた傾斜機能材の成分分布関数

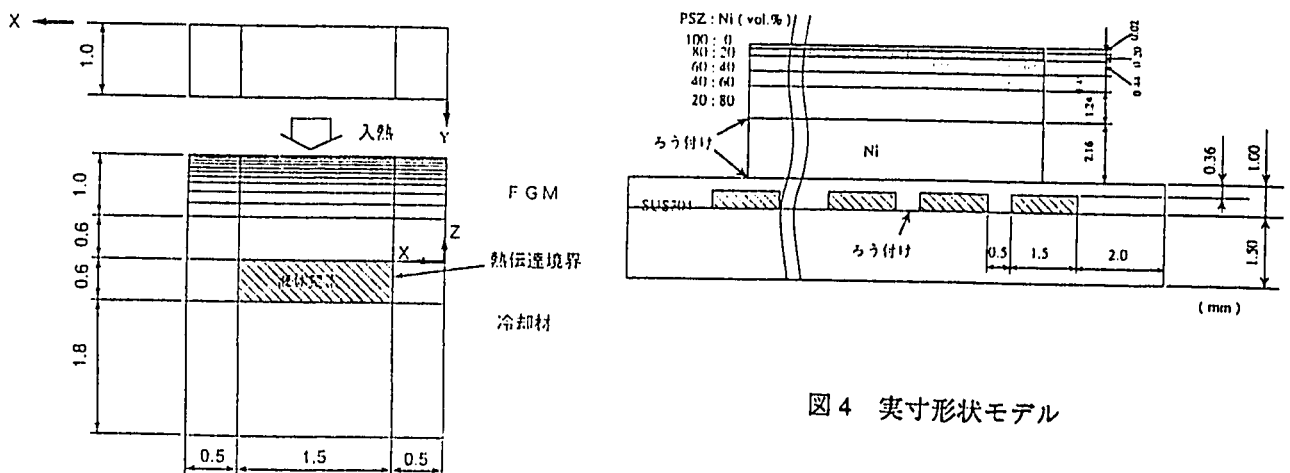


図4 実寸形状モデル

図3 高熱流束環境で

4. 4. 6 傾斜機能材の実体系への応用

(1)前述のとおり確立した実寸形状モデルでの解析手法により、NKKにより試作され、航技研(NAL)にて試験された、図1に示すPSZ/Ni系FGM供試体について、熱伝導・熱応力解析を行い、試験結果と比較することにより検証した。図2に熱伝導解析結果を、図3に熱応力(TS比)の解析結果を示す。解析結果では、表面から第2層まで亀裂が発生するという結果がでたが、実験では表面第1層に亀裂が入り、健全性の予測が可能となった。

(2)さらに、PSZ+SUSの2層積層材とPSZ/SUS系FGMの熱応力緩和特性を比較することにより、FGMの優位性を検証した。図4にTS比=1を限界として冷却条件および加熱条件をそれぞれ横軸、縦軸にとった2層積層材とFGM材の適用限界比較図を示す。FGMの方が2層積層材よりも低冷却、高加熱でも耐え得ることがわかる。

三次元構造体モデルによる非定常/弾・塑性解析

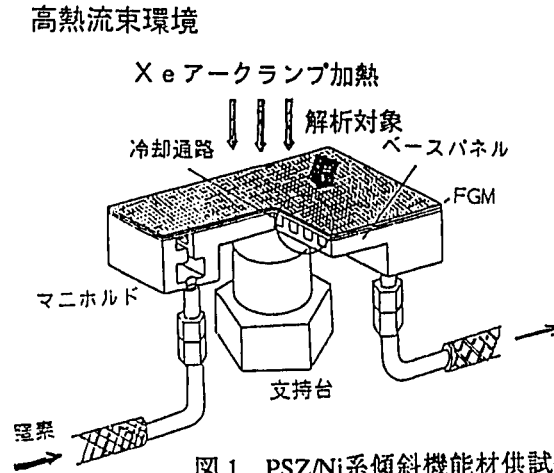


図1 PSZ/Ni系傾斜機能材供試体

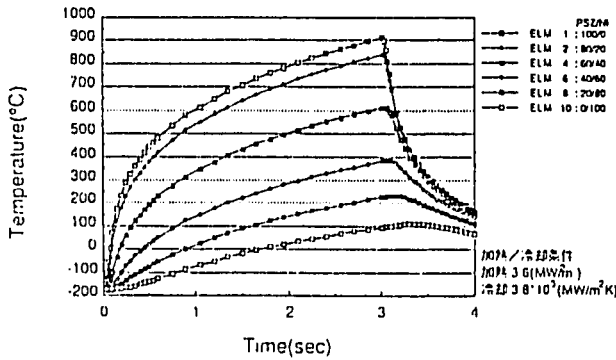


図2 熱伝導解析結果

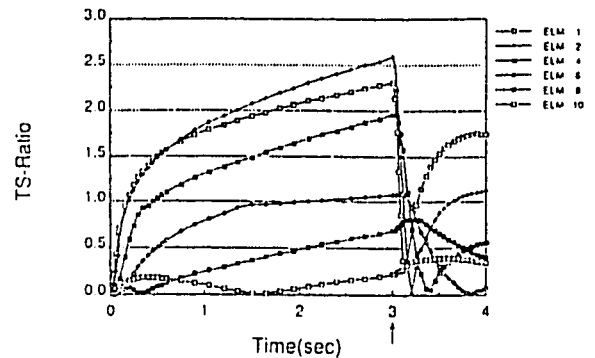


図3 熱応力 (TS比) 解析結果

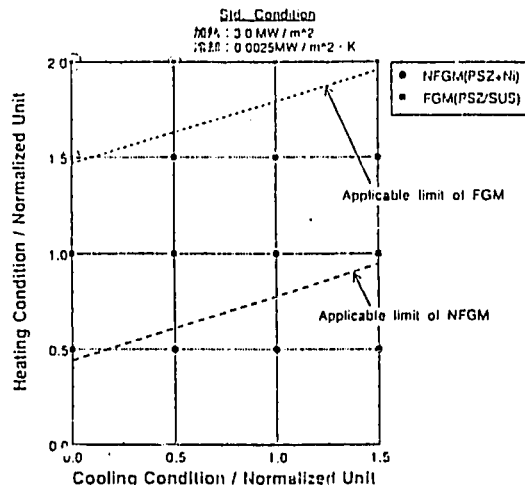


図4 2層積層材と傾斜機能材の適用限界比較図

4. 4. 7 傾斜機能材製造プロセスの開発

(1)粉末積層法 (MA/HIP法) によるPSZ/SUS系円筒状FGMの試作を行った。製造プロセスの詳細工程を図1に示す。本法では形状・寸法制御が困難であり、円筒状FGMの試作には適していないことが明らかとなった。

(2)粉末積層法 (MA/HIP法) によるPSZ/SUS系円盤状FGMの試作を行った。製造プロセスを図2に示す。本法では、セラミックス成分リッチ層の界面間強度が弱く、キャプセル除去時に亀裂が生じること、各層界面の平坦化および肉厚制御が困難であること等が明らかとなった。

(3)MA/真空プラズマ焼結法により円盤状PSZ/SUS系FGMの試作が可能となった。製造プロセスを図3に示す。混合粉末の均一化のためには、組成の違いによるMA条件および焼結条件の最適化が必要であり、健全なFGM製造のためには、多重焼結処理が必要であることが明らかとなった。

(4)スラリーディッピング法による円筒状Mo/SUS系FGMの試作を行い、製造条件の検討を行った。図4に製造プロセスを示す。

傾斜機能材試作工程

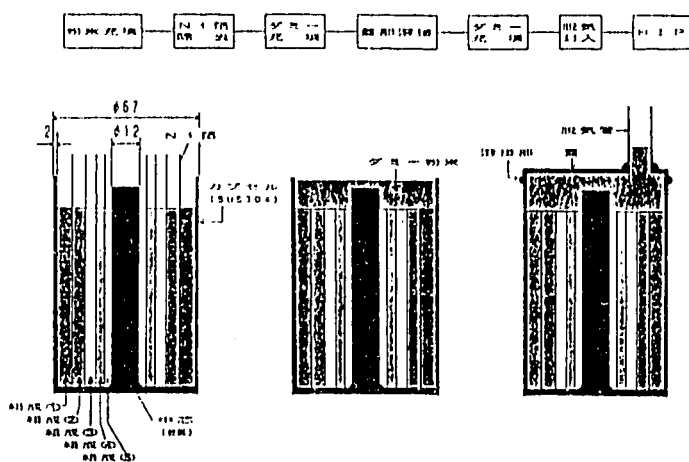


図1 円筒状傾斜機能材の製造プロセス(MA/HIP法)

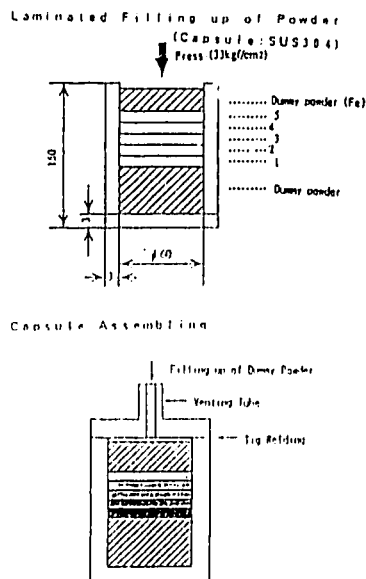


図2 円盤状傾斜機能材の製造プロセス(MA/HIP法)

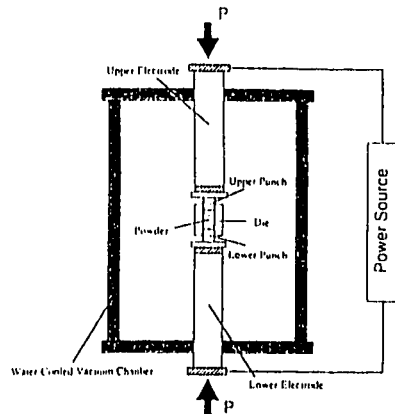


図3 円盤状傾斜機能材の製造プロセス(MA/プラズマ放電焼結法)

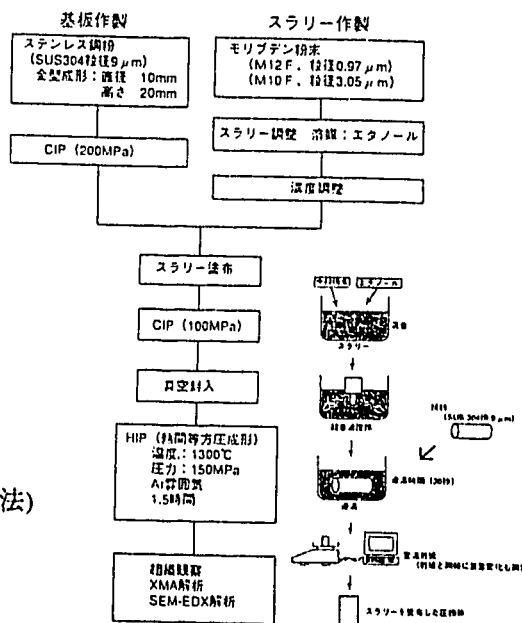


図4 円筒状傾斜機能材の製造プロセス(スラリー法)

4. 4. 8 傾斜機能材の試作および試作材の特性評価

(1)メカニカル・アロイング処理→プラズマ放電焼結法により $Al_2O_3/SUS316$ 系および $Si_3N_4/SUS316$ 系FGMの試作を行った。その結果、 $Al_2O_3/SUS316$ 系FGMは作製できたが、 $Si_3N_4/SUS316$ 系FGMはクラックが入り、作製することができなかった。図1に焼結条件の1例を、図2に本条件による $Al_2O_3/SUS316$ 系FGM試作材の外観写真を示す。また、表1に図2に示す試作材の各層における硬さ測定の結果を、図3にそのマクロ組織写真を示す。セラミックスの割合が多いほど硬さが増加した。

表1 硬さ測定結果

1層 Al_2O_3 90	2層 Al_2O_3 80	3層 Al_2O_3 70	4層 Al_2O_3 50	5層 Al_2O_3 25	6層 SUS316
1721	1705	1571	461	618	168

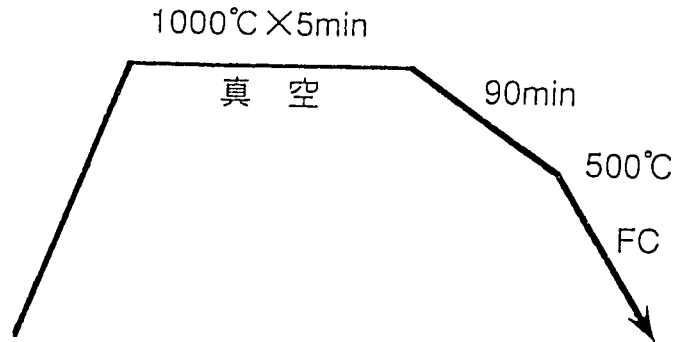


図1 焼結条件

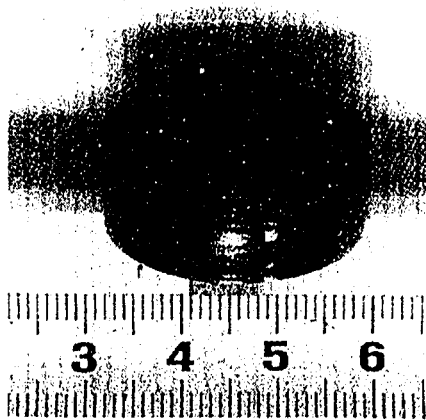


図2 $Al_2O_3/SUS316$ 系傾斜機能材焼結体の外観

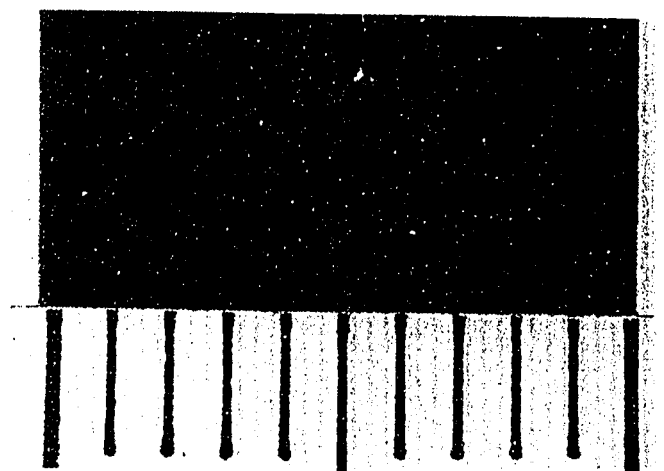


図3 $Al_2O_3/SUS316$ 系傾斜機能材焼結体のマクロ組織

4. 4. 9 高性能遮蔽材用金属水素化合物の特性評価

(1)金属水素化合物は水素密度が高いため、高速炉の炉内中性子遮蔽体用遮蔽材料として適している。そのため、12種類の金属水素化合物を候補材料として選定し、水素解離挙動、水素密度、核断面積、価格等のデータを収集した。図1に測定した各種金属水素化合物の1気圧における温度と水素/金属比を示す。水素解離特性、融点、酸化特性、毒性・危険性、経済性に関する総合評価を行い、有望な金属系として、Zr、Ti、Y、Gd、Hfの5種類を選定した。総合評価の結果を表1に示す。

(2)金属水素化合物ペレットの試作・評価：選定した5種類の金属系に対し、「直接水素化」「粉末のセラミック系接着剤による固化（接着剤法）」、「延性金属の表面被覆処理およびプレス成形（マイクロキャプセル法）」の3種類の方式によるペレット製造プロセスの検討を行った。直接水素化法では粉末化を避けることができず、また接着剤法およびマイクロキャプセル法では十分な理論密度比が得られなかった。そのため、上記の3方法はいずれも金属水素化合物ペレットの試作法として適用の見通しが得られなかった。

(3)海外での開発成果の調査：独のKNKでは、水素化ジルコニウムを減速材および遮蔽材として実用化しており、豊富な照射実績を有している。そのため、独から直接水素化法による水素化ジルコニウムペレットと、これに関する物性値、製造プロセス、照射挙動等の情報を入手した。また、原研より、原子力船「むつ」で使用した水素化ジルコニウムブロックを入手し、評価試験を行った。

(4)これらの取得データは、大型高速炉の設計研究で対象とされている、炉心燃料部と炉容器との間に適用される炉内遮蔽材としての金属水素化合物の遮蔽体設計にも利用していく予定である。

表1 有望成分の選定結果

	値段 1000yen/kg (Metal)	融点	H/M at 1atm 870°C	酸化 特性	毒性・ 危険性	総合 判定
Ti	3.0 ○	○	0.74 x	○	○	△
Ca	2.0 ○	x	1.37 △	x	○	x
La	28.5 △	x	1.01 △	x	○	x
Zr	7.0 ○	○	1.56 ○	○	○	◎
Eu	1045 x	x	700°C 1.87 ○	x	—	x
Sr	△	x	700°C 1.22 △	x	x	x
Ba	40.0 △	x	600°C 1.65 ○	x	x	x
Ce	28.5 △	x	2.35 ○	x	○	x
Gd	76.0 △	△	2.16 ○	○	—	○
Hf	75.0 △	○	1.46 △	○	○	○
Ta	75.0 △	○	0.10 x	○	○	x
Y	76.0 △	○	1.86 ○	○	x	○

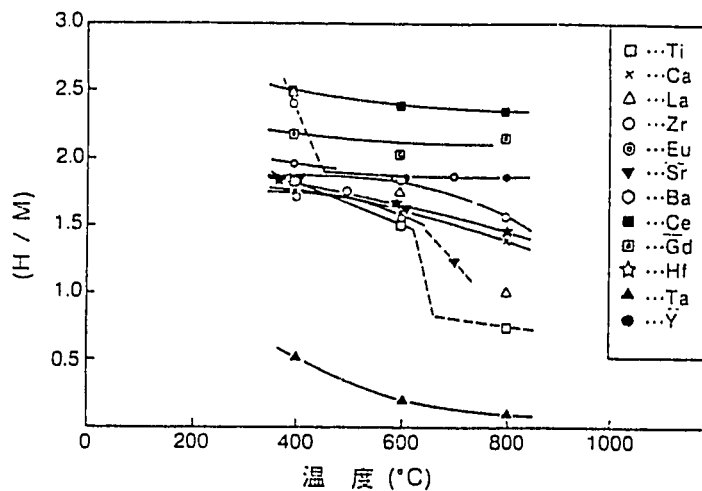


図1 化学的安定性の評価結果

4. 4. 10 高性能遮蔽材用水素バリアー材の開発

(1)金属水素化物は固化体として収納容器に密封した形態で使用することが想定される。ところが、金属水素化物は高温で解離しやすくなるため高温で水素が系外（特に、Na中）に散逸するのを防止する必要がある。さらに、遮蔽体は、優れた水素保持機能を有し、かつ40年間の寿命期間中にわたって、遮蔽性能を維持する必要がある。そのため、水素難透過性材料（水素バリアー材）の開発が不可欠である。

(2)金属水素化物を収納する容器の材料表面に水素バリアー材を適用する方法を検討した。

①収納材料への被覆処理技術の開発：系外への散逸を防止するための手段として、金属水素化物を収納する容器の材料表面に水素バリアー材を表面被覆処理する方法を考案した。収納容器材料中の水素の拡散透過による散逸を防止し、水素保持機能を高めるのが狙いである。

②被覆処理方法の検討：収納容器材料のステンレス鋼表面に水素バリアー材として効果の高い酸化物を形成させるための被覆処理方法として、カロライズ法とクロマイズ法を選定し、被覆処理後の水素透過量を測定した。その結果、図1および図2に各々示すように、カロライズ法による被覆処理によって、水素透過の明瞭な抑制機能が認められたが、クロマイズ法では水素透過の抑制機能がなかった。カロライズ処理により未処理材と比較して水素透過を3桁程度抑制できることがわかったことから、カロライズ処理を施した収納材料を採用することにより、金属水素化物を高速炉遮蔽体として適用できると考えられる。

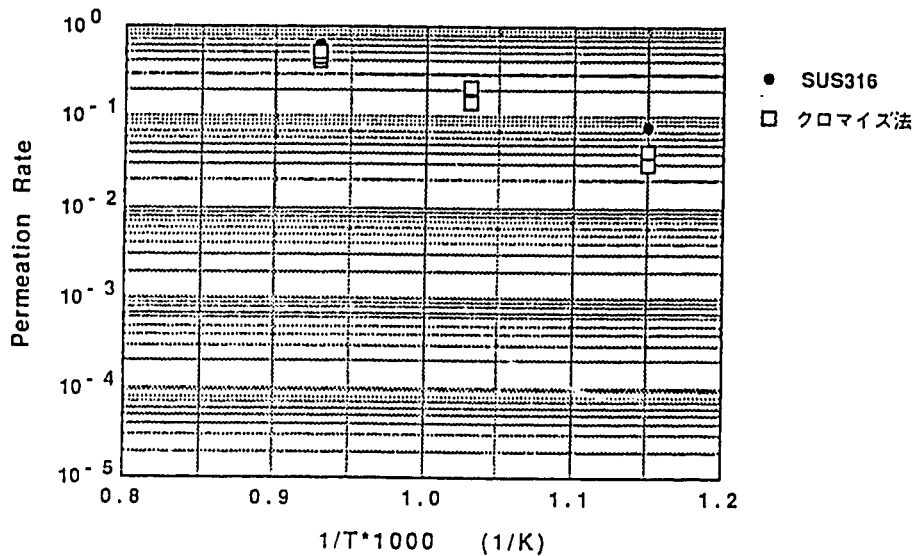


図1 クロマイズ処理による水素透過の抑制効果

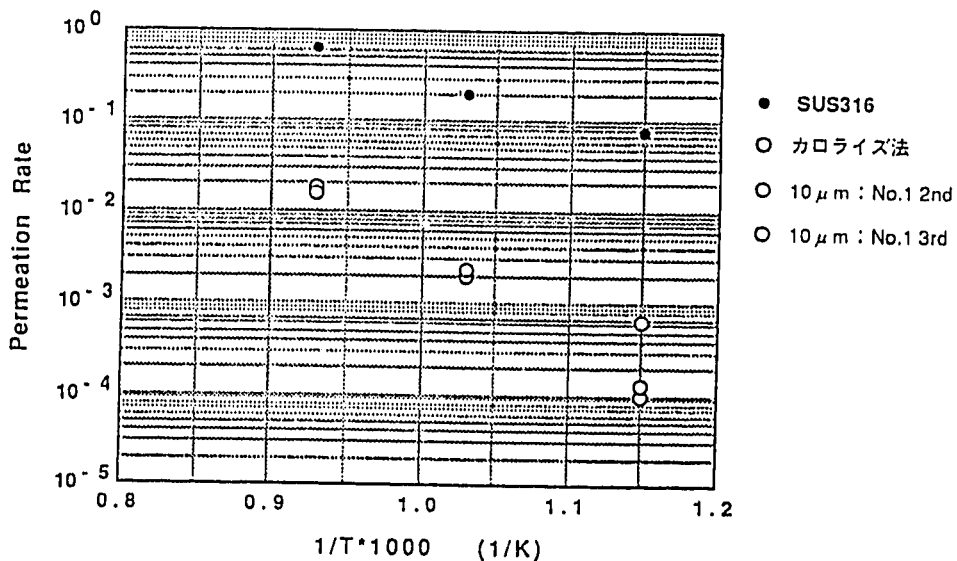


図2 カロライズ処理による水素透過の抑制効果

4. 4. 11 高性能遮蔽材用複合材料の材料設計

(1)構成成分の選定：中性子線あるいはγ線に対する遮蔽性能および耐熱性に優れる候補材料成分の検討結果を表1に示す。

(2)放射線環境の設定：創製する遮蔽材料の使用環境として、高速中性子遮蔽、熱中性子遮蔽、中性子線とγ線の同時遮蔽の必要な放射線環境を想定した。

(3)材料設計（構成成分の組み合わせ）：候補材料の中から各々の環境に対して有効な成分の組み合わせを、耐熱性の確保に留意し選定した。主成分として、高速中性子遮蔽用には中性子減速性能に優れる金属水素化合物および炭化ホウ素、熱中性子遮蔽用には中性子吸収性能に優れるガドリニアを選定した。中性子線とγ線の同時遮蔽用には中性子減速+中性子吸収+γ線遮蔽の効果を発揮させるため、黒鉛+ガドリニア+タングステン、金属水素化合物+炭化ホウ素+酸化タングステンの2種類の組み合わせを選定した。

(4)材料設計（遮蔽計算）：選定した各遮蔽材料成分とバインダー材の組み合わせに対し、遮蔽計算コードによる遮蔽計算を行い、配合比の検討を行った。図1および図2に各々核分裂中性子スペクトルおよび⁶⁰Coガンマ線に対する遮蔽計算結果の例を示す。表2に遮蔽計算により選定した試作材成分およびこれらの配合比を示す。

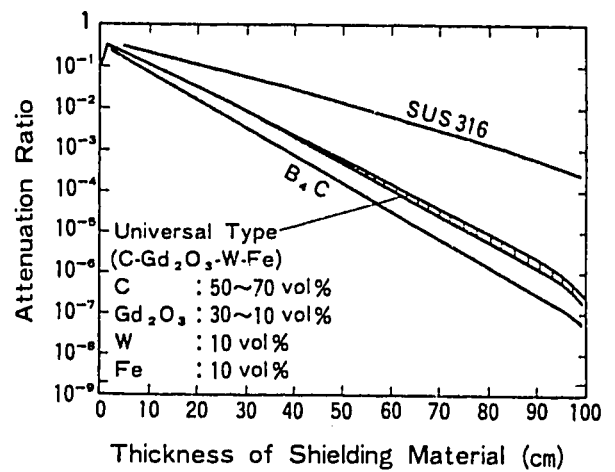
表1 各種遮蔽材成分の特性

成分	中性子減速能力	中性子吸収能力	γ遮蔽能力	耐熱性
金属水素化合物	◎	△	×	△
BeO	○	○	×	○
C	○	×	×	○
Fe	△	×	○	○
B ₄ C	○	○	×	○
EuB ₆	△	◎	×	○
Gd	×	◎	○	○
Gd ₂ O ₃	×	○	○	○
W	×	×	◎	○

◎：非常に優れる
○：優れる
△：やや劣る
×：劣る

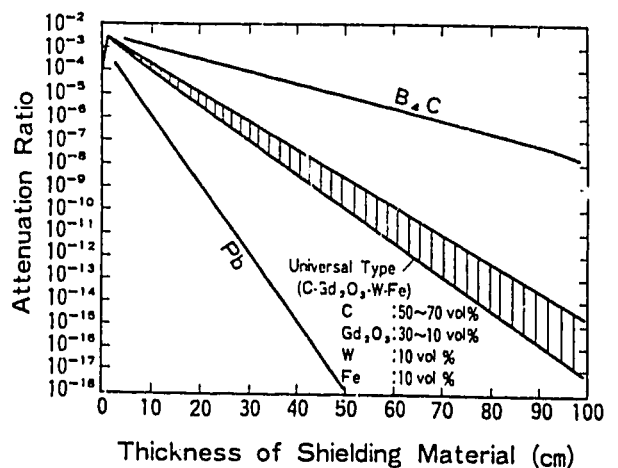
表2 遮蔽計算により選定した試作材成分および配合比

試作材	中性子遮蔽材			γ線遮蔽材	バインダー材
	C (40-70)	Gd ₂ O ₃ (30-10)	W (10)		
複合放射線場用	ZrH ₂ (20-30)	B ₄ C (10)	Fe ₂ O ₃ (5)	WO ₃ (20-30)	Al ₄ (PO ₄) ₃ (45-25)
	ZrH ₂ (40-80)			—	CnSiO ₃ (60-20)
高速中性子場用	B ₄ C (40-80)			—	CaSiO ₃ (60-20)
熱中性子場用	Gd ₂ O ₃ (40-80)			—	陶磁器原料 (60-20)



Neutron Source : Fission Spectrum of FBR

図1 遮蔽計算結果例（核分裂中性子スペクトルの場合）



γ-ray Source : ⁶⁰Co

図2 遮蔽計算結果例（⁶⁰Coガンマ線の場合）

4. 4. 12 高性能遮蔽材用複合材料の成形プロセスの開発および試作材の特性評価

(1)成形用バインダーの選定：遮蔽体として一体成形するためには、遮蔽用成分の他にバインダーが不可欠である。そこで以下の通りバインダー成分を選定した。

①高速中性子遮蔽材用バインダー：中性子減速能力に効果の高い低原子番号でかつ工業的な成形加工プロセスが確立済の珪酸カルシウムを選定した。

②熱中性子遮蔽材用バインダー：中性子吸収性能に優れたホウ素を含有する陶磁器原料を選定した。

③中性子線とγ線の同時遮蔽材用バインダー：密度特性および耐熱性に優れた鉄を選定した。中性子線とγ線の同時遮蔽用に金属水素化物を含有する系については、低温度で成形が可能なリン酸アルミニウムを選定した。

(2)成形プロセスの開発：放射線の種類、強度、エネルギーに応じ、自在に遮蔽材の成分を変化させるためには粉末冶金法による一体成形プロセスの開発が不可欠である。そこで材料設計で選定した遮蔽用成分とバインダーの混合系について一体成形プロセスを検討した。表1に検討した一体成形プロセスを示す。遮蔽特性の向上には真密度化を図る必要があり、1次試作では十分な密度特性が得られなかったため、2次試作では高温ホットプレス、CIPを適用して製造条件の最適化を試みた。

(3)試作材の特性評価：鉄をバインダーとした中性子線とγ線の同時遮蔽用については真密度化を達成し、曲げ強度および耐熱性に優れた成形体の開発に成功した。

(4)上述の成果をもとに、国内特許7件、米国特許1件、仏国特許1件を出願した。

表1 試作材の特性評価結果

タイプ	成分	試作材密度		曲げ強度 Kg/cm ²	ブリネル 硬さ	高温加熱後(700℃)	
		g/cm ³	%TD			寸法変化 %	外観
中性子線・γ線	C-Gd ₂ O ₃ -W-Fe	6.4	100	843	40	0	一部粉末化
複合照射環境用	TiH ₂ -B ₄ C-WO ₃ -Al ₄ (PO ₄) ₃	3.9	59	102	24	-0.3	良好
高速中性子	TiH ₂ -CaSiO ₃	2.6	73	80	12	+3.7	良好
照射環境用	B ₄ C-CaSiO ₃	1.2	47	145	9	-0.7	小クラック発生
熱中性子照射環境用	Gd ₂ O ₃ -陶磁器原料	3.6	56	96	9	0	良好

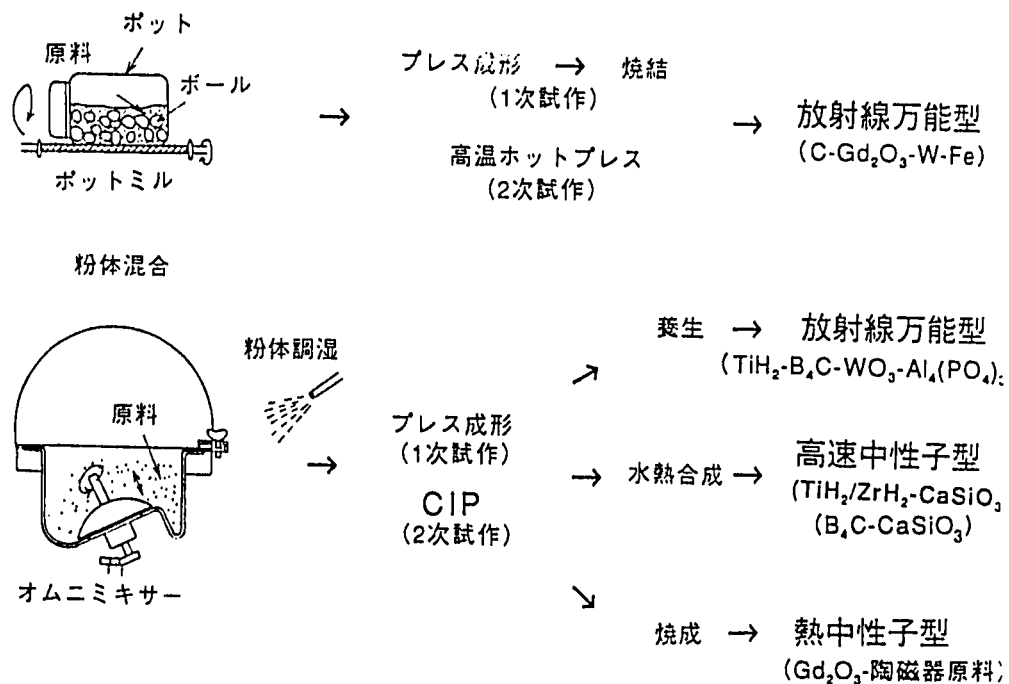


図1 成形プロセス

4. 4. 13 高性能制御材用候補材料成分の選定

(1)炉心用制御材として現状使用されている B_4C より長寿命な（耐割れ性が優れる）新型中性子吸収材を創製するため、以下の3方策を採用した。

① B_4C /金属複合材： B_4C を各種の金属と複合化することにより、 B_4C に金属の持つ高い靱性と延性並びに高熱伝導率を付与し、制御材ペレットの耐割れ性を向上する。さらに、金属の持つクリープ変形特性により、ACMI発生時の被覆管への応力を低減する効果も期待できる。金属の候補材として、表1に示す根拠に基づき、Ni, Zr, Mo, Cu-Niを選定した。

②ホウ素系化合物： B_4C 以外のホウ素系化合物の中で、ホウ素含有率の比較的高いものを選定し、その耐割れ性を調べ、 B_4C に対する優位性を見出そうとするものである。候補材として、表1に示す根拠に基づき、 EuB_6 , SiB_6 , TiB_2 を選定した。

③ B_4C /SiC ウィスカー複合材：高張力のウィスカー状セラミックスとの複合化により、 B_4C の靱性を向上しようとするもので、補強材としてはSiCウィスカーを選定した。

(2) B_4C 原料粉、4種の金属原料粉およびSiCウィスカーは各々表2～表4に示すものを使用した。 EuB_6 の平均粒径は $18.5\mu m$ および $7.4\mu m$ のものを、 SiB_6 は $26\mu m$ および $8.5\mu m$ のものを、 TiB_2 は $2.75\mu m$ のものをを使用した。

(3)選定した候補材料成分について、制御材ペレットの成形プロセスの検討を行い最適成形条件の探索を行った。

(4)試作したペレットについて、組織観察、組成・構造解析、元素分布測定を行うとともに、微小ビッカース硬さ、レーザーフラッシュ法による熱伝導率測定および $700^\circ C \times 15min$ 加熱 $\rightarrow 2min$ 水冷の熱衝撃特性の評価を行い、従来材である B_4C の特性と比較した。

表1 材料成分選定の根拠

B_4C/Ni	Niは B_4C との濡れ性が高い Niは加工性が良い
$B_4C/Cu-Ni$	Cuは B_4C と反応しない/耐熱伝導率が大きい Niは B_4C とCuとの濡れ性を改善する
B_4C/Zr	Zrは加工性が良い Zrは中性子吸収断面積での使用履歴が大きい
B_4C/Mo	Moは濡れ性が大きい/耐熱伝導率が大きい
B_4C/SiC	ウィスカーにより濡れ性化する/割れにくくなる ブリッジング効果・プルアウト効果
EuB_6	比熱が大きい Euは中性子吸収断面積が大きい
SiB_6	比熱が大きい
TiB_2	耐熱伝導率が大きい

表2 B_4C 原料粉の仕様

Item		Analytical Results	
Chemical Compositions	Total B (wt%)	75.0	
	Total C (wt%)	20.9	
	Total N (wt%)	0.26	
	Total O (wt%)	2.62	
	B_2O_3 (wt%)	0.39	
	B/C (mol Ratio)		3.99
	Fe (wt%)	0.40	
	Ti (wt%)	0.006	
	Co (ppm)	51	
	Cu (ppm)	21	
Mn (ppm)	49		
Na (ppm)	32		
Cl (ppm)	< 25		
F (ppm)	< 25		
Ave. Grain Size (μm)		1.4	
Process	$4H, BO_3 \rightarrow 2B_2O_3 + 6H, O$ $2B_2O_3 + 7C \rightarrow B_4C + 6CO \uparrow$		

表3 金属原料粉の仕様

Item	Catalogue Data			
	Ni	Zr	Mo	Cu
Purity (wt%)	≥ 99	≥ 97	≥ 99.8	≥ 99.8
Ave. Grain Size (μm)	3~7	3~7	2~3	100~200 mesh

表4 SiCウィスカー原料の仕様

Item		Catalogue Data	
		Raw Material (a)	Raw Material (b)
Chemical Compositions	SiO_2 (wt%)	< 0.5	< 0.5
	Co (wt%)	< 0.15	< 0.15
	Ca (wt%)	< 0.05	< 0.05
	Fe (wt%)	< 0.05	< 0.05
	Cr (wt%)	< 0.05	< 0.05
	Mg (wt%)	< 0.05	< 0.05
	Al (wt%)	< 0.08	< 0.08
Crystal Type		β	β
Diameter (μm)		0.1~1.0	1.0~1.4
Length (μm)		30~100	20~30
Aspect Ratio		ca.50~500	15~30
Content of Granular Material (wt%)		—	< 1

4. 4. 14 高性能制御材用成形プロセスの検討および試作材の キャラクターゼーション (I)

(1)ペレット成形方法として、ホットプレス法を採用した。混合、計量した原料粉は黒鉛モルトに充填し、予備加圧成形後、7Mpa置換した装置内で加圧しながら加熱した。加熱方法は、高周波誘導加熱である。成形プロセス条件(成形温度、成形圧力、成形時間)は試作材の仕様毎に最適な値を求めた。基本的には、成形圧力を350kg/cm²に設定し、成形温度を上げていき、適当な時間(30~60min)で成形が完了するようにした。金属成分の溶融によって成形温度をある限度以上に上げられない場合には、成形圧力を上げた。成形温度、成形圧力を変えてもペレットが得られない場合は、金属成分の混合比を変えた。炉内での使用中に生成するHeの放出性を考慮して成形後の目標密度は90%TDとした。ペレットの概略寸法は12.6φ×12.4Lである。

(2)表1に本研究で得られたB₄C/金属複合材ペレットの成形条件と試作ペレットの密度および組成・構造の同定結果を示す。いずれの金属複合材においてもB₄C単体の場合より低い温度でペレットを成形でき、かつ目標密度を満足するペレット成形条件を見いだした。

(3)図2に試作したB₄C/金属複合材ペレットの走査型電子顕微鏡観察結果を示す。いずれの試作材においてもホアの存在は認められたが、マイクロクラックの発生はなかった。しかしながら、Cuを除く金属成分はいずれも杓素と反応し、杓化物を生成した。一例として、B₄C/Mo複合材ペレットのX線回折結果を図2に示す。これらの反応による形態変化により、成形が進行しやすくなり、成形温度をB₄C単体の場合より低くできたと考えられる。B₄C/MoとB₄C/Cu-Niでは各々Mo₂B₅とCuの連続相が得られた。

(4)B₄C/ZrとB₄C/Moの場合は、本研究で対象としたすべての混合比で仕様を満足するペレットを成形できた。一方、B₄C/Niでは、Ni混合比が40vol%以下では、生成するNi₄B₃が低融点のため、溶融物が黒鉛モルトの隙間から漏れ出てしまいペレットを成形できなかった。B₄C/Cu-Niでは、Cuの融点(1083℃)以上で成形した場合、Cuは溶融し黒鉛モルトより溶出した。温度が低い時には密度が目標値に達しなかった。また、Cu-Ni混合比が低い場合も密度が十分上がらなかった。これはCuがB₄Cと反応しないため、反応による成形機構が働かないためと考えられる。目標密度90%TD近くを達成するためには、組成をB₄C:Cu-Ni = 50:50、Cu:Ni=90:10とし、成形温度を1040±10℃と精密に制御する必要がある。

表1 B₄C/金属複合材ペレットの成形条件および
キャラクターゼーション

	Compositions vol% (wt%)		manufacturing conditions	Density (g/cm ³)		X-Ray Diffraction
	B ₄ C	Metal		TD	Density of Pellet (Smear Density)	
B ₄ C/Ni	40 (16)	60 (84)	1000°C×350kg/cm ² 60min Hot Press	6.31	5.76~5.77 (91.2~91.4)	Ni ₄ B ₃ , B ₄ C, C
B ₄ C/Zr	80 (61)	20 (39)	1700°C×350kg/cm ² 60min Hot Press	3.31	2.96~2.97 (89.4~89.7)	ZrB ₂ , B ₄ C, C
	60 (37)	40 (63)	1700°C×350kg/cm ² 60min Hot Press	4.11	3.69~3.71 (89.8~90.1)	ZrB ₂ , B ₄ C, C
B ₄ C/Zr	40 (21)	60 (79)	1800°C×350kg/cm ² 60min Hot Press	4.92	4.41~4.46 (89.8~90.7)	ZrB ₂ , ZrC, C
	80 (50)	20 (50)	1800°C×350kg/cm ² 30min Hot Press	4.05	3.67~3.70 (90.4~91.2)	Mo ₂ B ₅ , MoB ₂ , MoB, B ₄ C
B ₄ C/Mo	60 (27)	40 (73)	1800°C×400kg/cm ² 30min Hot Press	5.60	5.08~5.11 (90.8~91.3)	Mo ₂ B ₅ , MoB ₂ , MoB, B ₄ C
	60 (30)	40 (70)	960°C×400kg/cm ² 80min Hot Press	5.07	3.79~3.93 (74.8~77.6)	Cu, B ₄ C, Ni ₄ B ₃ , C
B ₄ C/Cu-Ni	50 (22)	50 (78)	960°C×400kg/cm ² 60min Hot Press	5.71	4.56~4.67 (79.8~81.7)	Cu, B ₄ C, Ni ₄ B ₃
	50 (22)	50 (78)	1040°C×400kg/cm ² 30min Hot Press	5.71	4.96~5.06 (86.8~88.6)	Cu, B ₄ C, Ni ₄ B ₃
B ₄ C (Ref.)	100 (100)		1950°C×350kg/cm ² 90min Hot Press	2.51	2.21~2.31 (88.0~92.0)	B ₄ C

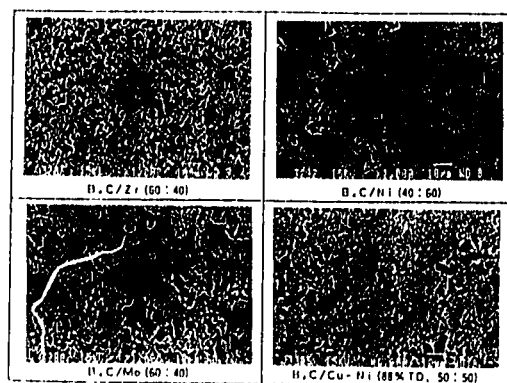


図1 B₄C/金属複合材ペレットの走査型電子顕微鏡観察

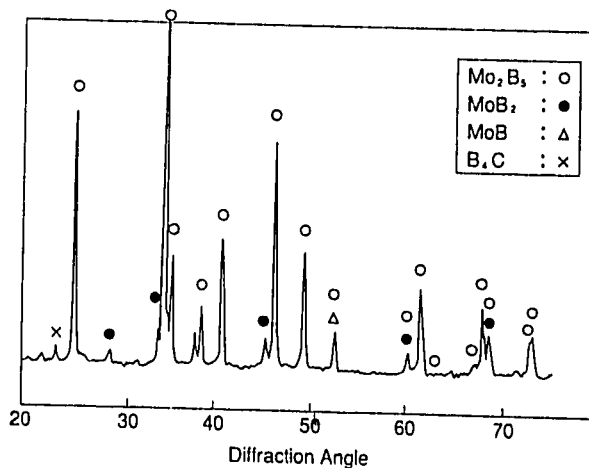


図2 B₄C/Mo複合材 (80:20) ペレットのX線回折

4. 4. 15 高性能制御材用成形プロセスの検討および試作材の キャラクターゼーション (II)

(1)表1 および表2 に各々ホウ素系化合物およびB₄C/SiCウイスキー複合材ペレットの成形条件と試作ペレットの密度および組成・構造の同定結果を示す。いずれの試作材においても目標密度を満足するペレット成形条件を見いだした。

(2)EuB₆ では、粗粒の原料粉を2000℃×350kg/cm²の条件で成形したところ、密度が目標値に達せず、また、ペレット表面で結晶粒の粗大化が生じた。ペレットの外表面は直接黒鉛モルトから熱を受ける部分であり、また成形時に圧力の高くなる場所であるため、焼結が進み結晶成長が活発になったものと考えられる。そのため、原料粉の微細化と成形条件を1900℃×400kg/cm²に変更することにより仕様を満足するペレットを得た。

(3)SiB₆ では、粗粒の原料粉を用いて成形したところ、ペレットの強度が低く、さらに黒鉛モルトと接着したため、冷却時の熱応力でペレットが破壊した。そのため、原料粉の微細化とBNモルトへの変更を行うことにより仕様を満足するペレットを得た。

(4)TiB₂ では、TiB₂ の連続相を有した仕様を満足するペレットを得た。

(5)B₄C/SiC ウイスキー複合材では、繊維強化効果を期待してアスペクト比の大きいSiCウイスキーを用い、他の試作材と同様に乾式ボールミルで混合・成形したところ、SiCウイスキーの分断が生ずるとともに、かさ密度の低いSiCウイスキーとかさ密度の高いB₄Cの混合状態が悪く、SiCウイスキーの凝集が認められた。そのため、エタノール溶媒中での湿式ボールミル法の採用と、原料をアスペクト比の低い太径のSiCウイスキーに変更することにより、仕様を満足するペレットを得た。

(6)図1 にB₄C/SiCウイスキー複合材ペレットの組織及び成分分布を示す。組織上連続相の存在が認められ、B₄Cマトリックス中に数10μm×数μm程度のウイスキー状SiCが観察された。X線回折の結果、B₄CとSiCとの反応は認められなかった。

表1 ホウ素系化合物ペレットの成形条件およびキャラクターゼーション

	manufacturing conditions	Density (g/cm ³)		X-Ray Diffraction	Notes
		TD	Density of Pellet (Smear Density)		
EuB ₆	2000℃×350kg/cm ² 30min Hot Press	4.08	4.02~4.11 (82.4~84.2)	EuB ₆	Grain Growth Raw Material 18 μm
	2000℃×350kg/cm ² 60min Hot Press		4.42~4.44 (90.6~91.0)	EuB ₆	Grain Growth Raw Material 7.4 μm
	1900℃×400kg/cm ² 150min Hot Press		4.35~4.40 (89.1~90.2)	EuB ₆	Raw Material 7.4 μm
SiB ₆	1850℃×350kg/cm ² 45min Hot Press	2.47	2.14~2.15 (86.6~87.1)	SiB ₆ , SiB ₄ Si ₃ FeSi ₂	Cracked Raw Material 26 μm
	1800℃×350kg/cm ² 40min Hot Press		2.18~2.19 (88.3~88.7)	SiB ₆ , SiB ₄ Si ₃ FeSi ₂	Raw Material 0.5 μm
TiB ₂	1350℃×350kg/cm ² 60min Hot Press	4.50	4.02~4.07 (89.4~90.3)	TiB ₂	

表2 B₄C/SiCウイスキー複合材ペレットの成形条件およびキャラクターゼーション

	Manufacturing Conditions	Density (g/cm ³)		X-Ray Diffraction	Notes
		TD	Density of Pellet (Smear Density)		
B ₄ C SiC Wisker	Dry Ball Mill 2000 C ×350kg/cm ² 30min Hot Press	2.65	2.36~2.37 (89.3~89.7)	B ₄ C β-SiC	SiC granulate
	Wet Ball Mill 1900℃×350kg/cm ² 90min Hot Press		2.37~2.39 (89.7~90.1)	B ₄ C β-SiC	

*1 Mixing Ratio B₄C : SiC Wisker 80 : 20(vol%) (75.9 : 24.1(wt%))

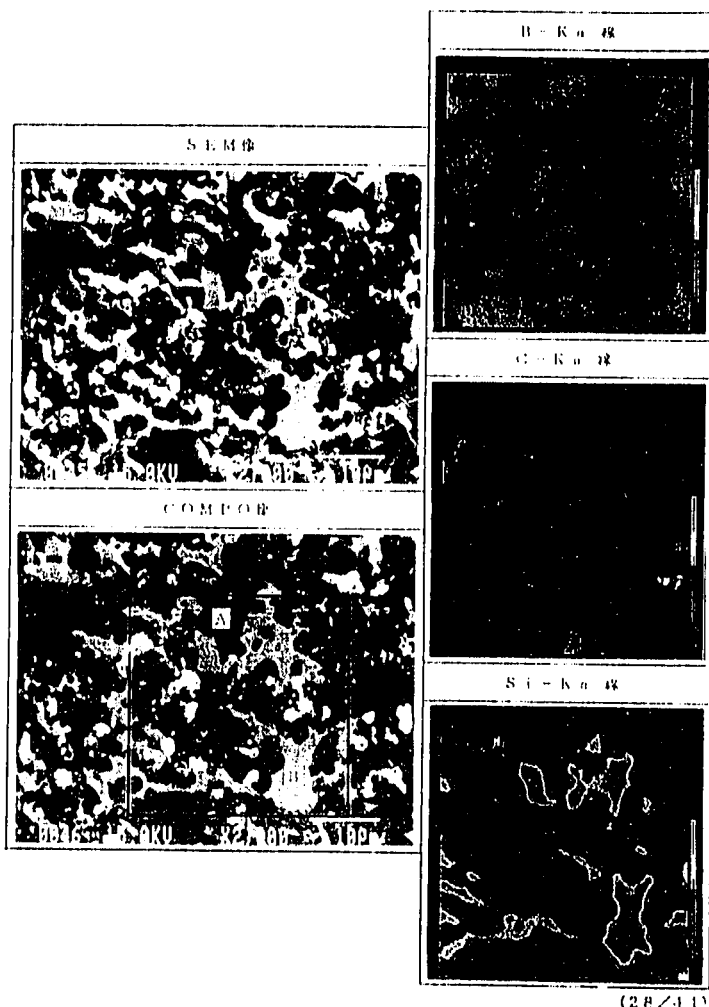


図1 B₄C/SiC ウイスキー複合材ペレットの組織および成分分布

4. 4. 16 高性能制御材用試作ペレットの炉外特性

(1)測定した熱拡散率、比熱および密度の積により算出した熱伝導率を図1に示す。多くの試作材が B_4C より高い熱伝導率を示し、熱応力発生を抑制する観点で、 B_4C より優位であることが明らかとなった。 $B_4C/Cu-Ni$ の熱伝導率が高いのは、Cuが網目構造の連続相を形成するため、熱伝導率の高いCuを通して熱が伝わるためと考えられる。 B_4C/Zr の熱伝導率が高いのは生成する ZrB_2 の熱伝導率が高いためと考えられる。

(2)熱衝撃試験により各々の試作ペレットが破壊したサイクル数を図2に示す。本試験条件では、 B_4C は7サイクルで破壊したのに対し、 EuB_6 を除くいずれの試作ペレットも耐熱衝撃性が B_4C より優れている傾向を示した。特に $B_4C/Cu-Ni$ は50サイクル後も破壊しなかった。これは $B_4C/Cu-Ni$ の熱伝導率が高いうえに、Cu単体が形成する連続相が熱衝撃を吸収するためと考えられる。 B_4C/Zr と B_4C/Mo では、熱伝導率は B_4C/Zr のほうが高かったが、耐熱衝撃性は B_4C/Mo のほうが優位であった。これは B_4C/Mo では Mo_2B_5 の連続相が得られたのに対し、 B_4C/Zr はかなりポーラスな、組織間の結合の弱い構造を示したためと考えられる。 B_4C/SiC ウイスキー複合材も優れた耐熱衝撃性を示した。これは、 SiC ウイスキーのブリッジング効果とプルアウト効果により破壊靱性が向上したためと考えられる。

(3)本研究の成果を総合評価した結果を表1に示す。試作ペレットの各種炉外特性の評価により、 $B_4C/Cu-Ni > B_4C/Mo > B_4C/SiC$ ウイスキー $> B_4C/Zr$ の順で、 B_4C より耐割れ性が優れていることを明らかにした。これにより、 B_4C より長寿命な新型中性子吸収材創製の見通しが得られた。

表1 炉外特性の総合評価結果

Material's				Evaluation (Ranked)			
No.	Chemical Compositions	Mixing Ratio (vol%)	Smear Density ** (%TD)	Thermal Conductivity	Thermal Shock Resistance	Hardness	Overall Evaluation
Ni40	B_4C/Ni	40 : 60	90	× 10	8	○ 4	×
Zr60	B_4C/Zr	60 : 40	90	○ 4	○ 5	○ 4	○ 4
		40 : 60	90	○ 2	6	(Not Evaluated)	△
Mo80	B_4C/Mo	80 : 20	90	× 9	(Not Evaluated)	8	(Not Evaluated)
Mo60		60 : 40	90	○ 5	○ 2	○ 4	○ 2
Cu60LD Cu50LD Cu50HD	$B_4C/Cu-Ni$	60 : 40	80	× 10	(Not Evaluated)	○ 1	(Not Evaluated)
		50 : 50	80	7	(Not Evaluated)	○ 1	(Not Evaluated)
		50 : 50	90	○ 3	○ 1	○ 3	○ 1
Eu	EuB_6	—	90	○ 5	× 10	○ 7	×
Si	SiB_6 **	—	90	× 12	○ 4	9	○
Ti	TiB_2	—	90	○ 1	6	(Not Evaluated)	△
SiC	B_4C/SiC Wisker	80 : 20	90	(Not Evaluated)	○ 3	(Not Evaluated)	○ 3
—	B_4C (Ref.)	—	90	8	8	10	—

*1 Nominal Value *2 Mixture of SiB_6 and Si

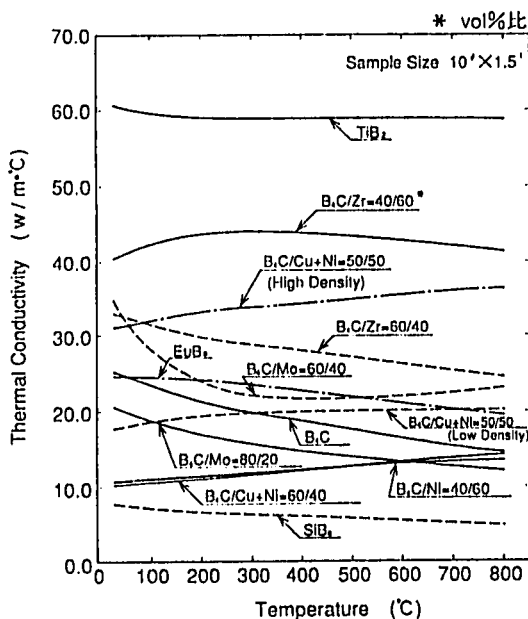


図1 試作ペレットの熱伝導率

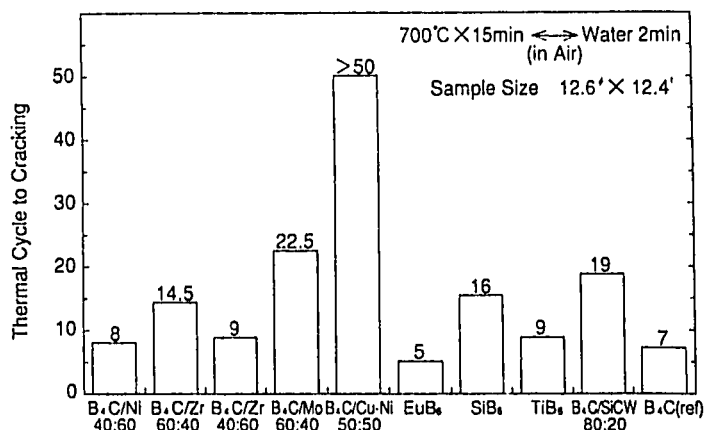


図2 試作ペレットの熱衝撃特性

4. 5 公表成果

(A. B. C. D. 共通)

- (1) 加納ら：高速炉における新素材 原子力工業 Vol. 34 No. 10 1988
- (2) S. Kano: Base Technology Development of New Materials for FBR Performance Innovations The 1st Japan International SAMPE Symposium and Exhibition held on Nov. 28- Dec. 1, 1989 at Nippon Convention Center, Chiba, Japan
- (3) 加納：耐ナトリウム性・耐放射線性新素材の開発, 第1回原子力極限環境材料シンポジウム 1990年9月20、21日
- (4) S. Kano, et. al.: Research on Creation of New Materials for Innovative Improvement of FBR 'Performance, FR' 91 International Conference, Oct. 28-31, '91, Kyoto
- (5) S. Kano, et. al.: Research on Creation of New Materials for Innovative Improvement of FBR Performance, Material Chemistry' 92 International Symposium, March 12-13, Tsukuba
- (6) 加納：原子力基盤クロスオーバー研究(原子力用材料)「原子力極限環境下の材料化学国際シンポジウム」 国際会議の窓 原子力学会誌 Vol. 34 No. 9 1992
- (7) 加納：複合環境用セラミックス系マルチコンポジットマテリアルと表面改質技術の開発 第2回原子力極限環境材料シンポジウム 1994年3月10、11日
- (8) 加納ら：原子力極限環境材料の開発に関する研究 耐ナトリウム性・耐放射線性新素材の開発 日本原子力学会 1993年春の大会 E30

(A. 新型セラミックス)

- (1) E. Yoshida, et. al.: Research on Creation of New Materials for Innovative Improvement of FBR Performance, (I) Sodium Compatibility of New Ceramics, Material Chemistry '92 International Symposium, March 12-13, Tsukuba
- (2) T. Mitsuhashi, et. al.: Ion Diffusion and Degradation in Ceramics, Material Chemistry' 92 International Symposium, March 12-13, Tsukuba
- (3) H. Haneda, et. al.: Sodium Ion Diffusion in Some Ceramics under Molten Sodium Condition, Material Chemistry' 92 International Symposium, March 12-13, Tsukuba
- (4) H. Haneda, et. al.: Grain Boundary Corrosion of Al_2O_3 and $Y_3Al_5O_{12}$ Ceramics by Molten Sodium, 6th International Conference on Intergranular and Interphase Boundaries in Materials, June 22-26, '92, Thessaloniki, Greece
- (5) S. Kano, et. al.: Sodium Compatibility of Ceramics, International Seminar on Material Behavior and Physical Chemistry in Liquid Metal System II, March 16-18, '93, Karlsruhe
- (6) 加納ら：液体金属国際セミナー 国際会議の窓 原子力学会誌 Vol. 35 No. 9 1993
- (7) 平川ら：高温ナトリウム環境下におけるニューセラミックスの腐食特性 (I) 650 °C, 1000 時間腐食特性, 日本原子力学会 1990年秋の大会 H4
- (8) 犬塚ら：溶融ナトリウムに浸漬したセラミックスの微細構造 日本金属学会 1991年秋期大会

- (9) 平川ら : Al_2O_3 の高温液体ナトリウム中における腐食特性, 日本セラミックス協会 第5回 秋期シンポジウム 1992年10月
- (10) 館ら : 各種セラミックスの高温ナトリウム腐食特性の評価, 日本セラミックス協会 第6回 秋期シンポジウム 1993年10月
- (11) 平川ら : 高純度化による Al_2O_3 の耐ナトリウム腐食特性の改善, 日本セラミックス協会 第6回 秋期シンポジウム 1993年10月
- (12) 犬塚ら : セラミックス微細構造への溶融ナトリウムの影響, 日本金属学会 1993年秋期大会
- (13) 館ら : 高温ナトリウム中におけるSiC の腐食挙動の検討, 日本セラミックス協会94年会
- (14) 平川ら : 高温ナトリウム中における Si_3N_4 の腐食挙動の検討, 日本セラミックス協会94年会

(B. 傾斜機能材)

- (1) 野村 : 傾斜機能材料構造体の熱応力モデル及び解析手法に関する研究 傾斜機能研究会 平成2年8月30日
- (2) 野村ら : 熱応力緩和のための傾斜機能材料開発の基盤技術に関する研究 FGMニュース、平成3年4月号
- (3) 原田ら : 傾斜構造体の三次元熱応力モデルに関する研究 第4回傾斜機能材料シンポジウム 平成3年11月
- (4) M. Harada, et.al. : Research on Creation of New Materials for Innovative Improvement of FBR Performance, (III) Development of Functionally Gradient Materials, Material Chemistry'92 International Symposium, March12-13, Tsukuba
- (5) 原田ら : 傾斜構造体の三次元熱応力モデルに関する研究 その2, 第5回傾斜機能材料シンポジウム, 1992年9月29日
- (6) M. Maruyama, et.al. : Elasto-Plastic Analysis of ZrO_2 /Metal FGM in High-Heat Flux Environment, The 2nd International Symposium on FGM, Nov. 1-4, '92, San Francisco
- (7) 西田ら : 傾斜機能材 (PSZ/Ni) の熱伝導・熱応力解析 第6回傾斜機能材料シンポジウム, 1993年10月29日-30日

(C. 高性能遮蔽材)

- (1) 井上ら : 放射線遮蔽用複合材料の創製、動燃技報、No78, June, '91
- (2) 井上ら : 放射線遮蔽用複合材料の開発、Isotope News, No449, 11月号、1991
- (3) 井上ら : 放射線遮蔽用複合材料、原子力工業、Vol. 38, No. 2, 1992
- (4) M. Inoue, et.al. : Research on Creation of New Materials for Innovative Improvement of FBR Performance, (II) High Performance Radiation Shielding Materials, Material Chemistry'92 International Symposium, March12-13, Tsukuba
- (5) 立辺ら : 高速炉用高性能中性子遮蔽材としての金属水素化物の開発, 日本原子力学会 1990年会 G29
- (6) 井上ら : 高性能放射線遮蔽材の開発 日本原子力学会 1991年春の大会 M51

- (7) 井上：放射線遮蔽用複合材料の開発，原子力産業会議 放射線利用研究会
アイソトープ利用グループ 第8回定例研究会 1993年2月16日
- (8) 特許 井上ら：耐熱高速中性子遮蔽材 平2-267756
- (9) 特許 井上ら：放射線遮蔽材 平2-267757
- (10) 特許 井上ら：耐熱放射線遮蔽材 平2-303185
- (11) 特許 井上ら：ガドリニウム系熱中性子遮蔽材 平2-303186
- (12) 特許 井上ら：ほう素化合物系中性子遮蔽材 平2-303187
- (13) 特許 井上ら：ほう素／炭素複合系中性子遮蔽材の製造方法 平3-132675
- (14) 特許 井上ら：炭化ほう素／炭素複合材及びその製造方法 平4-324315
- (15) 特許 米国出願：Heat-Resistant Radiation Shielding Material 07-789339
- (16) 特許 仏国出願：Heat-Resistant Radiation Shielding Material 9113186
- (17) 新聞報道 「複合材で放射線遮へい 軽量で耐熱性に優れる」 日刊工業新聞 3年3月27日
- (18) 新聞報道 「複合放射線遮蔽材を開発 中性子、ガンマ線同時遮蔽に威力」 原子力産業新聞
3年3月28日
- (19) 新聞報道 「中性子線、ガンマ線同時遮へいの複合材 動燃粉末や金法で試作」 電気新聞
3年3月27日
- (20) 新聞報道 「万能型放射線遮蔽材を開発」 日本工業新聞 3年3月27日

(D. 高性能制御材)

- (1) M. Kimura, et. al.: Research on Creation of New Materials for Innovative Improvement of FBR Performance. (IV) Development of High Performance Neutron Absorber Materials, Material Chemistry'92 International Symposium, March 12-13, Tsukuba

5. 研究交流活動および国内外調査等の成果

5ヶ年にわたる研究交流活動を表5.1にまとめる。

表5.1 各年度の研究交流関連活動

[平成元年度]	
●第1回原子力用材料研究交流委員会	平成元年10月26日 (原研東京本部)
○第1回研究会	平成2年1月31日 (三菱総研)
○第2回研究会	平成2年2月16日 (三菱総研)
●第2回原子力用材料研究交流委員会	平成2年3月5日 (東京、霞山会館)
○第3回研究会	平成2年3月9日 (三菱総研)
[平成2年度]	
○第4回研究会	平成2年4月20日 (原研東京本部)
○第5回研究会	平成2年5月9日 (三菱総研)
◎第1回原子力極限環境材料シンポジウム	平成2年9月20日～21日 (原研東京本部)
●第3回原子力用材料研究交流委員会	平成2年9月21日 (原研東海研)
○第6回研究会	平成2年12月20日 (三菱総研)
★第1回勉強会	平成3年1月31日～2月1日 (動燃箱根)
○第7回研究会	平成3年2月21日 (三菱総研)
●第4回原子力用材料研究交流委員会	平成3年3月8日 (東京、霞山会館)
[平成3年度]	
★第2回勉強会	平成3年9月12日～13日 (原研夏海クラブ)
●第5回原子力用材料研究交流委員会	平成3年9月13日 (原研東海研)
●第6回原子力用材料研究交流委員会	平成4年3月11日 (工技院化技研)
◎第1回原子力極限環境下の材料化学国際シンポジウム [Material Chemistry '92]	平成4年3月12日～13日 (工技院)
[平成4年度]	
●第7回原子力用材料研究交流委員会	平成4年8月31日 (原研東京本部)
○第8回研究会	平成5年1月14日 (三菱総研)
●第8回原子力用材料研究交流委員会	平成5年2月22日 (動燃本社)
●海外調査	平成5年3月6日～21日 (欧州4ヶ国)
[平成5年度]	
●第9回原子力用材料研究交流委員会	平成5年9月13日 (原研東京本部)
★第3回勉強会	平成5年11月4日～5日 (動燃箱根)
◎第2回原子力極限環境材料シンポジウム	平成5年3月10日～11日 (三菱総研)
●第10回原子力用材料研究交流委員会	平成5年3月11日 (三菱総研)

●、◎は参画機関の研究結果発表を含む。◎は公開。

5. 1 原子力用材料研究交流委員会

交流委員会は年2回、これまでに計10回開催されている。それらの主な審議議題は以下の通りである。

<第1回>

時、所：平成元年10月26日、原研本部第一会議室

- 1) 委員の紹介および主査挨拶
- 2) クロスオーバー研究の趣旨説明
- 3) 各研究機関の原子力用材料研究の紹介
- 4) 交流委員会の活動方案説明

<第2回>

時、所：平成2年3月5日、霞山会館さくらの間

- 1) インテリジェント材料研究および原子力基盤技術データフリーウェイ構築研究の概要紹介
- 2) 研究評価について
- 3) 各研究機関の研究進捗状況紹介

<第3回>

時、所：平成2年9月21日、原研本部第一会議室

- 1) 平成2年度活動方案（第1回国内シンポジウム終了報告を含む）
- 2) 平成3年度原子力基盤研究概算要求額
- 3) 研究評価小委員会の設置について
- 4) 各研究機関の平成2年度前期研究進捗状況

<第4回>

時、所：平成3年3月8日、霞山会館竹の間

- 1) 平成2年度の調査・研究活動状況報告
- 2) 平成3年度予算政府原案について
- 3) 研究評価小委員会での審議状況
- 4) 各研究機関の平成2年度研究進捗状況および3年度の研究計画案

<第5回>

時、所：平成3年9月13日、原研東海研研究1棟第1会議室

- 1) 評価小委員会での審議状況について
- 2) 平成4年度原子力基盤研究概算要求状況
- 3) 研究調査活動状況
- 4) 各研究機関の平成3年度前期研究進捗状況

<第6回>

時、所：平成4年3月11日、工技院化技研6階会議室

- 1) 平成3年度調査・研究活動状況
- 2) 平成4年度予算政府原案について
- 3) 研究評価について
- 4) 各研究機関の平成3年度研究進捗状況および4年度の研究計画案
- 5) 研究交流の実績および今後の予定
- 6) 国際シンポジウムについて

<第7回>

時、所：平成4年8月31日、原研本部第一会議室

- 1) 中間評価作業状況
- 2) 平成5年度原子力基盤研究概算要求状況
- 3) 原子力用材料第2期研究の展望
- 4) 平成4年度研究交流活動状況と平成4年度前期研究進捗状況紹介

<第8回>

時、所：平成5年2月22日、動燃本社B1会議室

- 1) 平成4年度調査・研究活動状況
- 2) 平成5年度予算政府原案について
- 3) 各研究機関の平成4年度研究進捗状況および5年度の研究計画案
- 4) 第Ⅱ期計画調査票について
- 5) 第Ⅱ期計画事前評価総合所見について

<第9回>

時、所：平成5年9月13日、原研本部第三会議室

- 1) 原子力基盤技術研究専門部会答申結果および平成6年度概算要求状況
- 2) 平成4年度海外調査報告および平成5年度研究調査活動状況
- 3) 平成5年度研究交流活動状況

<第10回>

時：平成6年3月11日

- 1) 第2回国内シンポジウム報告
- 2) 第Ⅰ期原子力用材料クロスオーバー研究の全体成果
- 3) 第Ⅰ期原子力用材料クロスオーバー研究評価作業部会報告

第3回 研究会

テーマ	材料及び環境のキャラクタリゼーション
開催日	平成2年3月9日(金曜日)
場所	三菱総合研究所 セミナー室
参加者	28名
講演内容および講師	①高分子材料のモレキュラーキャラクタリゼーション (化技研 服部 滋) ②レーザーラマン分光法の金属腐食同定への応用 (名工大 大塚 俊明) ③金属セラミック複合構造管の開発およびそのキャラクタリゼーション (東工大 小田原 修) ④表面分析で何がどこまで解るか (日本電子 最上 明矩)

第4回 研究会

テーマ	照射場における反応・損傷の現象と機構
開催日	平成2年4月20日(金曜日)
場所	日本原子力研究所 本部 第3会議室
参加者	23名
講演内容および講師	①炭素材料の表面損傷 (金材研 北島 正弘) ②表面反応に関連した化学反応の動力学計算 (金材研 中村 一隆) ③高温照射下における黒鉛の挙動 (原研 衛藤 基邦) ④Angle-Resolved Photoemission Study of NbC Surface (東工大 枝元 一之) ⑤高速炉照射場における材料挙動と物性変化 (動燃 柴原 格)

第5回 研究会

テーマ	新材料・新素材の研究動向	
開催日	平成2年5月9日(水曜日)	
場所	三菱総合研究所 セミナー室	
参加者	38名	
講演内容および講師	①鉄系新材料について	(新日本製鉄 中澤 崇徳)
	②エンジニアリングセラミックスの研究動向	(無機材研 田中英彦)
	③原子力用材料の研究開発動向	
	—金属材料技術の研究活動を中心として—	(金材研 野田 哲二)
	④放射線と有機系材料の最近の研究動向	(東大 田川 精一)
	⑤耐熱・放射線半導体材料の開発	(電総研 吉田 貞史)
	⑥宇宙環境での新材料創製	(NASDA 菊山 紀彦)
	④電荷変換衝突過程と固体表面	(京大 今西 信嗣)

第6回 研究会

テーマ	腐食等の表面物理化学現象と実験解析技術 (I)	
開催日	平成2年12月20日(木曜日)	
場所	日本原子力研究所 本部 第1会議室	
参加者	28名	
講演内容および講師	①材料とナトリウムとの共存性に関する研究	(動燃 吉田 英一)
	②熔融塩と材料との相互作用	(原研 加藤 義夫)
	③水蒸気及びヘリウムによる材料腐食	(金材研 阿部 富士雄)
	④水素と金属との相互作用	(原研 長崎 正雅)
	⑤高分子材料の環境劣化	(織高研 中野 詔彦)

第7回 研究会

テーマ	腐食等の表面物理化学現象と実験解析技術 (II)	
開催日	平成3年2月21日 (木曜日)	
場所	三菱総合研究所 セミナー室	
参加者	26名	
講演内容および講師	①腐食環境下におけるセラミックスの安定性	(東北大工 佐藤 次雄)
	②耐火物の侵食と評価方法	(黒崎窯業 池末 明生)
	③金属間化合物表面と水素ガス中不純物との相互作用	(金材研 平田 俊也)
	④原子炉級黒鉛材料のガス化腐食と耐食性改良の研究	(原研 今井 久)

第8回 研究会

テーマ	各種環境—材料の組み合わせで起こる破壊のメカニズム	
開催日	平成5年1月14日(木曜日)	
場所	三菱総合研究所 セミナー室	
参加者	46名	
講演内容および講師	①傾斜機能材料の開発動向	(東北大工 高橋 秀明)
	②環境強度研究の現状と将来動向	(京大工 箕島 弘二)
	③炭素材料の破壊	(茨城大工 奥 達雄)
	④高分子材料の破壊の微視機構	(山形大工 成澤 郁夫)
	⑤セラミックスの破壊とプロセッシング	(東工大工 木村 脩七)

第1回 勉強会

テーマ	材料と表面物理化学	
開催日	平成3年1月31日(木曜日)、2月1日(金曜日)	
場所	箱根「光雲荘」(動力炉・核燃料開発事業団研修所)	
参加者	29名	
サブテーマおよびパネラー	①熔融塩環境	山村力(東北大)、沼田博雄(東工大)、山本義和(IHI)
	②ガス環境	斉藤安俊(東工大)、中曾根祐司(金材研)、中村吉伸(東大)
	③液体金属環境	伊藤卓志(動燃)、遠藤寛(東芝)、横田憲克(日立)
	④水溶液環境	泉谷雅清(日立)、平野秀朗(電中研)、山之内直次(NKK)
	⑤プラズマ環境	相良明男(核融合科研)、石垣隆正(無機材研)、中村一隆(金材研)
	⑥表面反応	村田顕二(大阪府大)、富取正彦(東工大)、小島勇夫(化技研)、一村信吾(電総研)

第2回 勉強会

テーマ	新材料創製のための計算機手法および製造プロセス等応用技術
開催日	平成3年9月12日(木曜日)、9月13日(金曜日)
場所	大洗「夏海クラブ」(日本原子力研究所研修所)
参加者	34名
サブテーマおよびパネラー	<p>①計算機による新材料の創製(機能性材料中心) 篠嶋妥(茨城大)、梅原雅捷(無機材研)、大野英雄(原研)</p> <p>②計算機による新材料の創製(構造材料中心) 森永正彦(豊橋技科大)、榎本正人(金材研)、横川晴美(化技研) 田辺和俊(化技研)</p> <p>③新材料創製のためのプロセス技術及びキャラクタリゼーション技術 (構造材料中心) 渡辺龍三(東北大)、市原祥次(三菱油化)</p> <p>④新材料創製のためのプロセス技術及びキャラクタリゼーション技術 (機能性材料中心) 山村泰道(岡山理大)、豊島史郎(神戸製鋼)、児島慶享(日立)</p>

第3回 勉強会

テーマ	原子力複合環境における材料の腐食・劣化
開催日	平成5年11月4日(木曜日)、11月5日(金曜日)
場所	箱根「ヴィラ・ジャポネ」(動力炉・核燃料開発事業団研修所)
参加者	33名
サブテーマおよびパネラー	<p>①水環境及び放射線効果 米澤利夫(三菱重工)、高木純一(東芝)、稲垣正寿(日立) 稲積透(日本鋼管)</p> <p>②プラズマ・ガス・放射線環境 功刀資彰(原研)、高橋平七郎(北大工)、日馬康雄(原研) 馬場祐治(原研)、山崎信助(物質研)</p> <p>③液体金属・熔融塩環境 左右田龍太郎(無機材研)、寺井隆幸(東大工)、館義昭(動燃) 高橋和雄(日立)、吉田英一(動燃)、加藤義夫(原研)</p>

5. 3 研究交流および研究協力

研究交流および研究協力の概要を表5.2に示す。

表5.2-1 交流委員会メンバー間の研究交流、協力

	機 関	内 容	開始時期	形 態	備 考
1	PNC, NIRIM	セラミックスのNa腐食	平成2年	共同研究契約	MC92'等で発表
2	NRIM, JAERI	γ線照射及び解析	平成3年	高崎研施設利用, 共同解析	
3	NCLI, JAERI	同 上	同 上	同 上	
4	NRIM, NIRIM 東工大	Li2Oの合成, 照射, 分析	平成3年	試料合成, 分析, 照射の研究分担	一部日米WSで 発表
5	NRIM, NIRIM	イオン照射酸化物 の振動解析	平成4年	試料作成, 照射, 測 定・解析の分担, 情報交換	
6	JAERI, PNC	金属水素化物	平成2年	試料提供, 情報交換	
7	JAERI, NKK	実用合金の開発	平成元年	合金製造	
8	PNC, 新日鉄	新型セラミックス創製	平成3年	試料提供	
9	JAERI, NRIM 名工大	その場解析技術	平成3年	ラマン分光解析法の 情報交換	
10	JAERI, NRIM 東工大, 名 工大	同 上	平成3年	偏光解析法の情報交 換	
11	NCLI, NRIM	高分子材のイオン と結合状態解析	平成4年	装置の相互利用, 方 法論の知的交流共同 評価・解析	

PNC:動燃事業団, JAERI:原研, NRIM:金材技研, NIRIM:無機材研, NCLI:化技研(物質研)

表5.2-2 交流委員会メンバー間の研究交流、協力

	機 関	内 容	開始時期	形 態	備 考
1	NRIM, 筑波大	表面過程の動的研究 測定解析	平成3年	共同研究, 人的交流	
2	NIRIM, NCLI	熱力学計算法	平成3年	計算法の情報交換	
3	NCLI, 製科研	高分子の低分子収着 と陽電子消滅	平成3年	試料提供, 測定解析 の研究分担	
4	PNC, 東北大	傾斜機能材	平成2年	試料提供, 材料試験, 共同評価	
5	PNC, 名大	腐食セラミックス材の高分 解能電顕観察	平成元年	試料提供, 分析共同 評価	
6	PNC+東北大 フラインセラミックス センター, 黒崎 窯業	セラミックスのNa腐食	平成3年	耐食性, 試料提供, X線解析, 共同評価, 情報交換	
7	JAERI+原燃 サービス, 住友 化学	データベース	平成2年	データ提供, データベース 構築	

PNC: 動燃事業団, JAERI: 原研, NRIM: 金材技研, NIRIM: 無機材研, NCLI: 化技研 (物質研)

5. 4 国内シンポジウム

5. 4. 1 第1回国内シンポジウム

第1回原子力極限環境材料シンポジウムは平成2年9月に開催した。本シンポジウムは、原子力用材料クロスオーバー研究の概要紹介と平成元年度研究成果報告を目的としたものである。シンポジウムでは参画5機関の成果報告のほか、関連研究の報告、招待講演などが行われ、一般参加者と参画機関からの出席者として約90名が参加した。また、材料科学の分野で用いる各種分析機器メーカー、商社など延べ14社がポスターセッションに出展した。

本シンポジウムの概要を表5.3にまとめた。

表5.3 第1回原子力極限環境材料シンポジウム概要

名 称	第1回原子力極限環境材料シンポジウム
開 催 日	1990年9月20日(木)～9月21日(金) 2日間
開催場所	日本原子力研究所東京本部 第1および第2会議室 〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル15階
主 催	原子力基盤技術総合的研究推進委員会 原子力用材料研究交流委員会
主要テーマ	照射場の現象解明から材料開発まで ①原子力極限環下の材料化学 ②極限環境材料の材料挙動とキャラクタリゼーション ③材料の劣化機構 ④新材料の創製と評価
参 加 者	講演者： 11名 (招待講演者を含む) 一般参加： 42名 参画機関： 50名 合計92名
発表論文等	オーラルセッション：11件 ポスターセッション：14社展示発表 (説明者32名)
関連資料	講演資料集

5. 4. 2 第2回国内シンポジウム

平成元年度より開始した原子力用材料クロスオーバー研究では、原子力極限環境下における腐食現象や劣化現象の解明と、環境への耐性を向上した材料の開発を進めてきた。

次年度から始まる第Ⅱ期クロスオーバー研究では、複合環境用マルチコンポジット材料を革新的創製手法により開発することを目指している。このため、関連分野の諸先生による講演と参画機関（金材技研、無機材研、物質研、原研、動燃）の研究計画の概要説明を行い、議論を通じて研究計画の啓蒙と内容の向上を図ることとした。

本シンポジウムの概要を表5.4にまとめた。

表5.4 第2回原子力極限環境材料シンポジウム概要

名 称	第2回原子力極限環境材料シンポジウム
開 催 日	1994年3月10日（木）～3月11日（金） 2日間
開催場所	（株）三菱総合研究所 セミナー室 〒153 東京都目黒区下目黒1-8-1 アルコタワー10階
主 催	原子力基盤技術総合的研究推進委員会 原子力用材料研究交流委員会
主要テーマ	複合環境用マルチコンポジットマテリアルの開発に向けて ①耐環境性の優れた新素材 ②マルチコンポジット化手法 ③表面改質技術 ④複合環境におけるin-situ解析技術
参 加 者	講演者： 11名（招待講演者を含む） 一般参加： 20名 参画機関： 20名 合計50名
発表論文等	オーラルセッション：11件
関連資料	講演資料集

5. 5 国際シンポジウム

本研究のこれまでの成果と現状を広く国内外に報告し、あわせて、関連分野の研究者も含めて情報交換や討論を行う場を設けることとなり、下記の国際シンポジウムを開催した。

表5.5 国際シンポジウム概要

名 称 和文名称 英文名称	原子力極限環境下の材料化学に関する国際シンポジウム International Symposium on Material Chemistry in Nuclear Environment 【MATERIAL CHEMISTRY '92】
開催日	1992年3月12日(木)～3月13日(金) 2日間
開催場所	工業技術院筑波研究センター共用講堂 〒305 茨城県つくば市東1-1-4
主 催	原子力基盤技術総合的研究推進委員会 原子力用材料研究交流委員会
後 援	科学技術庁 金属材料技術研究所 無機材質研究所 化学技術研究所 日本原子力研究所 動力炉・核燃料開発事業団
テ ー マ	①構造材料の環境劣化機構の解明 ②極限環境材料のキャラクタリゼーション ③表面反応の素過程 ④化学的活性環境下の熱力学 ⑤新材料の創製と評価
参加者	国 外： 13名(招待講演者を含む) (国籍別内訳：米3、仏2、独2、韓4など) 国 内： 147名(参加登録者のみ) 合計160名
発表論文	オーラルセッション：24件 ポスターセッション：37件 合計61件
関連資料	プログラム、プロシーディングス

シンポジウムでの各セッションの報告内容は以下の通りである。

(1) オーラルセッション【環境劣化機構】

燃料被覆管の腐食(軽水炉)や炉水環境のステンレス鋼の腐食割れ、高燃焼度燃料の被覆管内面の物理的・化学的侵食(高速炉)、高熱流束下のプラズマ対向材料(核融合炉)、硝酸や強酸化性イオン存在下の腐食(燃料再処理)など6件の研究内容が紹介された。これら原子力特有の苛酷な環境の材料劣化は環境側およ

び材料側の要因が支配しており、ミクロおよびマクロレベルの基礎的な研究の必要性が報告された。

(2) オーラルセッション【セラミックス】

セラミックスは高温腐食環境における優れた耐食性や機械的性質を備えているので、原子力分野の構造材料や機能性材料として有望視されている。セラミックスと金属との接合界面の構造と反応機構、熔融塩中や液体ナトリウム中の腐食機構など4件の研究発表があった。

(3) オーラルセッション【表面構造と反応素過程】

放射線照射を受ける材料表面の物理的・化学的侵食の素過程を明らかにするためには、表面の構造や化学的状態を解析する必要がある。本セッションでは、低エネルギーイオンビームや電子ビームによる表面の化学結合状態の解析、水溶液中での酸化不動態皮膜形成の「その場」解析、照射表面での化学反応の実時間「その場」解析など5件の研究発表があった。

(4) オーラルセッション【液体金属中での共存性】

ナトリウム、リチウム、リチウム-鉛合金などの液体金属中材料の腐食機構や材料の適合性が紹介された。また、高速炉の性能を向上させるために採用が検討されている、ニューセラミックス、複合材料、傾斜機能材料などの新材料開発の成果と現状が報告された。

(5) オーラルセッション【高分子材料の劣化過程とキャラクタリゼーション】

高分子の照射劣化過程を解明するためには、分光学的手法、自由体積や分子量など精査手法で分子レベルの解析が行われている。最近、物質中の自由体積の推定に陽電子消滅法の利用が進んでおり、最新の応用法が紹介された。また、放射線誘起反応初期過程の解析に、ナノ秒級のイオンビームパルス放射線分解法が紹介された。

(6) オーラルセッション【新素材】

核燃料の新製造技術に関する基礎的研究のほか、原子力用途材の新合金設計手法や原子レベルでの皮膜形成過程のシミュレーション手法などが報告された。

(7) ポスターセッション

参画機関のクロスオーバー研究成果の詳細や本シンポジウムのテーマに関連した研究成果が合計36件発表された。

5. 6 国内調査

主要研究者との議論を通じてクロスオーバー研究参画機関以外の研究機関との交流の可能性を探ることを主な目的として訪問調査を行った。表5.6に訪問先と調査内容をまとめる。

表5.6 訪問先および調査内容

No	訪問先	調査内容	入手資料
1	黒崎窯業(株)技術研究所 (平成2年11月)	耐火材の腐食現象とその機構、および耐食性向上に係わる技術開発	論文1 参考資料5
2	(株)東レリサーチセンター (平成3年1月)	高分子キャラクタリゼーションに関する研究ポテンシャル	論文2 参考資料5
3	東北大学金属材料研究所 (平成3年1月)	・CVDによる傾斜組成セラミックス製造研究(平井教授) ・高耐食性アモルファス合金(橋本教授) ・材料表面分析(山口教授)	論文8 論文10 論文17
4	東北大学工学部 材料加工学科 (平成3年1月)	傾斜機能材料の製造・評価技術の研究開発動向	論文34
5	名古屋工業試験所 (平成3年1月)	エンジニアリングセラミックスの製造技術、評価技術等の研究開発動向	論文4 参考資料4
6	(財)ファインセラミック スセンター (平成3年1月)	セラミックスの開発およびキャラクタリゼーション技術などに関する研究ポテンシャル	参考資料5
7	住友化学工業(株) 筑波研究所 (平成3年2月)	化学産業の材料開発動向と研究ポテンシャル	参考資料2
8	新技術開発事業団 増原極微変換プロジェクト (平成3年9月)	レーザー利用高分子反応研究と時間および空間の高分解能測定法開発の現状	論文5 参考資料5
9	(株)神戸製鋼 材料研究所 (平成3年10月)	材料製造技術の開発動向と研究ポテンシャル	参考資料3
10	大阪大学産業科学研究所 (平成4年1月)	陽電子消滅法の応用法に関する低速陽電子利用研究の現状(加速器利用)	論文1
11	(株)新日本製鉄 先端技術研究所 (平成4年1月)	陽電子消滅法の応用法に関する低速陽電子利用研究の現状(RI利用)	参考資料2
12	(株)松下テクノロジー 材料試験部 (平成4年9月)	電子材料分野の表面技術の動向と研究ポテンシャル	参考資料3 論文5
13	工業技術院 北海道工業技術研究所 (平成5年9月)	スパッタ法による複合材料合成と解析及び短時間微小重力場を利用した材料生成	参考資料2 論文1

5. 7 海外調査

5. 7. 1 目的

本調査は次の3項目を目的として実施した。

- ①原子力用材料クロスオーバー研究成果に関して欧州の研究者とワークショップを開催し、情報交換を行う。
- ②原子力および非原子力分野の材料技術開発の研究ポテンシャルおよび今後の動向を調査する。
- ③次回国際シンポジウム開催の案内を行う。

これらによって日本の原子力政策への理解、クロスオーバー研究の評価・ブラッシュアップを図り、海外研究機関とのクロスオーバー研究の可能性の判断や主要研究者の特定を目指すこととした。

5. 7. 2 訪問機関

以下の欧州4ヶ国5研究機関を訪問した。

- ①FOM原子分子物理学研究所（オランダ）
- ②CEAカダラッシュ研究所（フランス）
- ③JRCイスプラ研究所（イタリア）
- ④カールスルーエ研究所（ドイツ）
- ⑤CRNストラスブール研究所（フランス）

5. 7. 3 調査団メンバー

表5.7 調査団メンバー

	氏名	所 属	役 職
団 長	岡本 眞實	東京工業大学 原子炉工学研究所	教授
団 員	加納 茂機	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 技術開発部 先進技術開発室	主任研究員
	北島 正弘	金属材料技術研究所 第2研究グループ 第1サブグループ	サブグループリーダー
	小林 慶規	物質工学工業技術研究所 計測化学部 状態分析研究室	主任研究官
	菱田 俊一	無機材質研究所 第1研究グループ	主任研究官

5. 7. 4 調査期間

平成5年3月6日（土）～平成5年3月21日（日）
表5.8に訪問スケジュールを示す。

表5.8 海外調査日程表

月 日	訪 問 先	備 考
3月 6 (土)	(移動)	成田(SK984)→コペンハーゲン コペンハーゲン(SK553)→アムステルダム
7 (日)		ワークショップ準備
8 (月)	F O M原子分子物理学研究所	ワークショップ開催
9 (火)	(移動)	アムステルダム(AF2401)→パリ
10 (水)		ワークショップ準備
11 (木)	(移動)	パリ(IT6035)→マルセイユ
12 (金)	C E Aカダラッシュ研究所	ワークショップ開催
13 (土)	(移動)	マルセイユ(LX721)→チューリッヒ
14 (日)	(移動)	チューリッヒ(SR622)→ミラノ
15 (月)	J R Cイスプラ研究所	ワークショップ開催
16 (火)	J R Cイスプラ研究所	ワークショップ開催(午前のみ) ルガノ(列車)→カールスルーエ
17 (水)	カールスルーエ研究所	ワークショップ開催
18 (木)	(移動)	カールスルーエ(列車)→ストラスブール
19 (金)	C R Nストラスブール研究所	ワークショップ開催
20 (土)	(移動)	ストラスブール(IT5008)→パリ
21 (日)	(移動)	パリ(SK564)→コペンハーゲン コペンハーゲン(SK983)→成田

5. 7. 5 成果の概要

(1) 全般的な成果

各機関でクロスオーバー研究成果に関するワークショップを開催し、情報交換を行うことができた。クロスオーバー研究の目的、実施方法、研究成果等に各国の研究者が注目していることが感ぜられた。第二期計画に係わる技術情報や国際交流を念頭においた交流研究機関、研究者の絞り込みの指針を得ることができた。

(2) 機関別の成果

① FOM研究所

材料研究において、やや物理的な視点に偏った研究が進められている印象を受けた。原子力用材料クロスオーバー研究が化学的な視点も取り込んでいる方針の正しさを確認できた。

② カダラッシュ研究所

主として燃料研究の概要の説明を受けた。セラミックス研究におけるプロセス開発やキャラクターゼーション技術に関する情報を得た。

③ イスプラ研究所

水素同位体透過研究や材料の照射効果に関する研究について議論した。但し、研究のアプローチには格別新規性が見られず、クロスオーバー研究でも材料開発の観点から斬新な発想を進める必要性を確認した。

④ カールスルーエ研究所

核融合炉用セラミックス、ナノセラミックス創製技術、接合技術、インシュレーター用セラミックス膜、セラミックス照射特性等の情報を得た。

⑤ ストラスブル研究所

加速器を利用した表面改質手法やそれに伴う欠陥の解析手法などの情報を得た。

6. 第Ⅱ期原子力用材料クロスオーバー研究計画

6. 1 研究全体計画

(1) 研究課題及び期間

原子力用材料クロスオーバー第Ⅱ期研究は、「複合環境用マルチコンポジットマテリアルの開発」を研究課題として、平成6年から10年の5年間で実施する計画である。本研究では、産・学・官のクロスオーバー研究協力により金属材料技術研究所、無機材質研究所、物質工学工業技術研究所、日本原子力研究所及び動力炉・核燃料開発事業団の5つの機関において研究分担して実施する予定である。

(2) 研究目的

新型プラントの開発及び現行プラントの高性能化のブレークスルーには、原子炉燃料／冷却材、再処理硝酸溶液／熱媒体、核融合炉プラズマ／冷却材／ブランケット、大電流搬送体／原子炉環境等のように、諸性質が大きく異なる異種環境間のバリアに使用するバウンダリー材料の開発が不可欠である。それらの材料には、双方の環境に対する耐放射線腐食性と共に、機械的性質、伝導性、熱特性等の諸物性上の要求及び中性子の吸収・減衰や誘導放射能等の原子力特有の核的性質に関連したニーズ等に対応した多面的な材料特性を併せ持ち、さらに、それらが高度の信頼性で長期にわたり維持されることが要求される。上記の多重の材料特性が要求される複合環境用マルチコンポジットマテリアル（以後、MCMと略称する）を革新的創製手法により開発することを計画している（図6.1に概念図を示す）。

まず、対象環境との共存性及び要求性能に優れた金属、セラミックス、有機各系統の新素材を開発すると共に、基礎理論及び経験論による新材料設計手法を駆使して、異種材料間の傾斜・複合化・接合等の新技術によるマルチコンポジット化を図る。さらに、各種表面処理法を開発して表面改質を行い、マルチの耐環境性と材料特性を併せ持つ材料を開発する。併せて、複合環境中の表面反応、腐食現象及び材質劣化や諸機能低下をリアルタイムで解析する複合手法を開発して、各用途環境に対する開発材の適用性を解析・評価する計画である。当該材料の開発手法は、腐食性の強い熱媒体間のバウンダリー材料として長期耐久性が要求される原子力プラントの炉心材料、各種熱交換器並びに廃棄物処理関連装置水素製造や燃料電池等の熱化学反応機器材料、特殊環境用計装材料の高性能化技術として反映できるほか、一般工業分野の同種の用途への波及効果が大きい材料基盤技術と考えられる。

(3) クロスオーバー研究として意義

新型プラントの開発及び現行プラントの高性能化等のブレークスルーには、原子力極限環境と称される放射線作用と物理的・化学的な腐食・侵食作用が重畳した複合環境に耐える高性能新素材の開発が不可欠である。当該研究は、性質の大きく異なる環境に対応した各種の材料の開発技術や諸特性の評価手法のほか、放射線腐食性環境下のシミュ

レーション試験技術等の多岐にわたる要素技術を総合的に必要とする基盤研究である。この観点から、当該研究は、各機関が得意とする要素技術を相互に出し合うことにより効率的な研究分担体制が図れるほか、各種試験装置や照射施設等の共同利用及び国際協力等を通してより良い成果が期待できるクロスオーバー研究に最も適した研究課題の一つと考えられる。

(4) 研究内容

(2) 項に述べたように、原子力特有の複合環境間のバウンダリーに使用する実用材料を念頭に、1)耐放射線腐食性に優れた複合環境用マルチコンポジットマテリアル (MCM) と2)複合環境に対応したその場解析手法の開発を行う。

1)では、第I期研究で開発した合金、セラミックス及び高分子有機材料等の新素材の開発技術をベースにして、接合、組成傾斜、異種材料の分散等の複合化手法及び各種の表面処理法を選定・開発して、原子力プラントにおける複合環境間のバリア性能に優れた耐放射線腐食性の複合材料を創製する。

2)では、放射線腐食性環境中で長期供用が可能な時間・空間分解能に優れた、その場解析手法を開発して、開発材の特性の解析・評価と複合環境における材質劣化や腐食・侵食等の諸現象の本質的な解明に資する。

(5) 各機関が実施するサブテーマ及び年次計画

①複合環境材料の表面反応・欠陥成長過程の実時間解析と表面物性評価 (金属材料技術研究所) ;

金属クラスター反応による新物質の創製とプロセスの研究及び高速反応検出解析手法の開発を行い、生成メカニズム及び表面反応・欠陥成長機構を解析する。

②複合環境用セラミックスのマルチコンポジット化とその多次元的评价 (無機材質研究所) ;

イオン注入、薄膜化、微視的複合化等によりセラミックスの表面・内部を改質したMCMの開発と表面分析等の複合解析手法による欠陥構造や表面反応の微視的解析を行う。

③高分子系ハイブリッドマテリアルと劣化解析技術の開発 (物質工学工業技術研究所) ;

有機高分子とシリカガラス等の複合化による有機/無機系MCMの開発と高分子材料の分子レベルの微細構造変化や高温の分子特性の評価手法開発による劣化現象の解析を行う。

④複合環境用金属系マルチコンポジットマテリアルと腐食モニタリング技術の開発 (日本原子力研究所) ;

耐食合金をベースとして接合、組成傾斜、分散複合化による金属系MCMの開発を行うほか、放射線腐食性溶液に適用できる、その場解析手法を開発して腐食現象を解析する。

⑤複合環境用セラミックス系マルチコンポジット材料と表面改質技術の開発
(動力炉・核燃料開発事業団) ;

組成傾斜・微視的複合化等によるセラミックス系MCM耐熱材と接合法及び各種ビーム注入による表面改質法の開発を行い、新型プラントに対する適用性を評価する。

表6.1 各研究項目の年次工程

実施機関	平成6年度	7	8	9	10
金材技研	クラスター反応の解析と新物質創製				
	←		手法の原理開拓	表面物性測定・評価	→
無機材研	セラミックスの改質手法開発				
	←		表面分析、諸物性解析手法開発	欠陥構造、表面反応解析	→
物質工研	有機高分子材料のハイブリッド化				
	←		分子レベルの特性評価手法開発	高温・環境特性評価試験	→
原 研	合金素材高性能化 金属系複合材料開発				
	←		その場解析技術開発	放射性溶液中腐食試験	→
動 燃	セラミックス系複合材料、接合技術開発				
	←		表面改質技術開発	新型プラントへの適応性評価	→

(6) 目的とする研究成果及び波及効果

具体的な研究成果として、

①各機関の既開発の単体材料に複合化や表面処理等の新技术を駆使することにより、数段に耐放射線腐食性の優れ、また使用対象の複合環境におけるバリアー材としての適応性に優れた高性能材料の創製手法を開発する。

②時間・空間分解能に優れた分析・解析技術を開発して、材質劣化や腐食・侵食等の諸現象の本質的な解明と新原理による材料開発や評価手法開発に役立てるほか、原子力プラント機器の信頼性評価用モニタリング技術に応用する。

波及効果として、

- ①一般工業用途に使用出来る複合化技術及び表面処理等の材料改質手法
- ②製造技術の高度化による高性能新素材の汎用化

- ③特殊機能性に優れた新素材の発現による特殊工業用途材への応用
- ④プラント機器材料の健全性評価に応用できるモニタリング技術
- ⑤工業材料の寿命予測に必要な基盤情報の提供
- ⑥新しい表面状態の動的解析手法の開発及び学問分野の開拓

さらに、クロスオーバー研究として実施することにより、得られた研究成果のデータベース化や非原子力分野に反映できる総合的な材料要素技術として集約する計画である。

(7) その他

各研究実施機関の研究項目及び研究分担の違いを表6.2、図6.2に、当該クロスオーバー研究としての研究協力体制の概念図を図6.3に、それぞれ示す。

表6.2 原子力用材料クロスオーバー研究における参画5機関の研究分担の課題及び主要項目の比較表

項目	機関名	金属材料技術研究所	無機材料研究所	物質工学工業技術研究所	日本原子力研究所	動力炉・核燃料開発事業団
第I期課題	原子力極限環境材料の開発研究 (H1~5)	原子力極限環境における材料化学に関する研究	セラミックスの腐食に関する研究	原子力極限環境下における高分子材料の劣化挙動の解明と探索	極限環境用の耐食製造技術の開発	耐ナトリウム放射性新素材の開発
		複合環境材料の表面反応・成長過程の実際時間性評価と表面物性評価	複合環境用セラミックスの多様な機能的评价	高分子ハイドロリゾル分解技術の開発	複合環境用セラミックスと合金系金属材料の開発	複合環境用セラミックスと合金系金属材料の表面改質技術の開発
第II期課題	複合環境用マテリアル(MCM)の開発研究 (H6~10)	炭素、合金系	セラミックス系	高分子・有機系	金属系	セラミックス系
		複合化手法	複合イオン交換樹脂	ゾル・ゲル法	傾斜分散・複合クラッド多層接合	傾斜分散・複合イオン等の照射熱処理等
MCM開発法	放射線環境食性腐食現象の解析手法の開発	真空及びプラズマ	(基礎物性のマイクロ解析)	酸化性雰囲気	硝酸、水等高濃度の溶液	液体金属
		空間・時間分解能の解析手法	拡散速度測定法及び微小解析法	自由体積測定法、分子重量測定法、陽電消滅法等	分光・電気化学及び複合手法	熱物性測定技術の検討

* M C M ; マルチコンポジットマトリアル略称、** 複合 ; マイクロキャプセル化等

複合環境 I	バウンダリー材料	複合環境 II
高腐食性	バリアとしての性能 (耐照射性、機械的性質、耐食性)	高熱負荷
	諸物性の要求 (熱特性、伝導性・絶縁性等)	
	核的性質関連の要求 (低誘導放射能、中性子吸収減速能等)	

● 新型炉炉心材料

炉心冷却材	被覆材	燃料 (及び 吸収材、制御材等)
液体金属 → 放射性クラッド ← 高温水 →	腐食減肉、変質 質量移行 照射誘起腐食割れ PCI (環境割れ)	FPガス ← I、Cs、Te等 ← 機械的作用

● 核融合炉第一壁構造材料

放射性クラッド ← 高温水 →	真空第一壁	プラズマ
	照射誘起腐食割れ スパッタリング ディスラプション等 (局部減肉、溶融・高温割れ)	→ プラズマ汚染 ← 高速粒子 電子、n

● 再処理硝酸プロセス機器材料

放射性核種 (FP、 TFU) 含有の 熱石炭酸液 → 溶解・析出・逃散 ←	反応容器材料	熱媒体
	腐食減肉、局部侵食、応力腐食割れ	← 高温蒸気等

● 原子炉計装用有機系材料

強γ線場の 酸化性環境 →	絶縁性被覆材料	電流送電体
	酸化劣化、脆化・変質	← 密着性 (発熱)

図6.1 複合環境用マルチコンポジットマテリアル (MCM) の開発の概念図

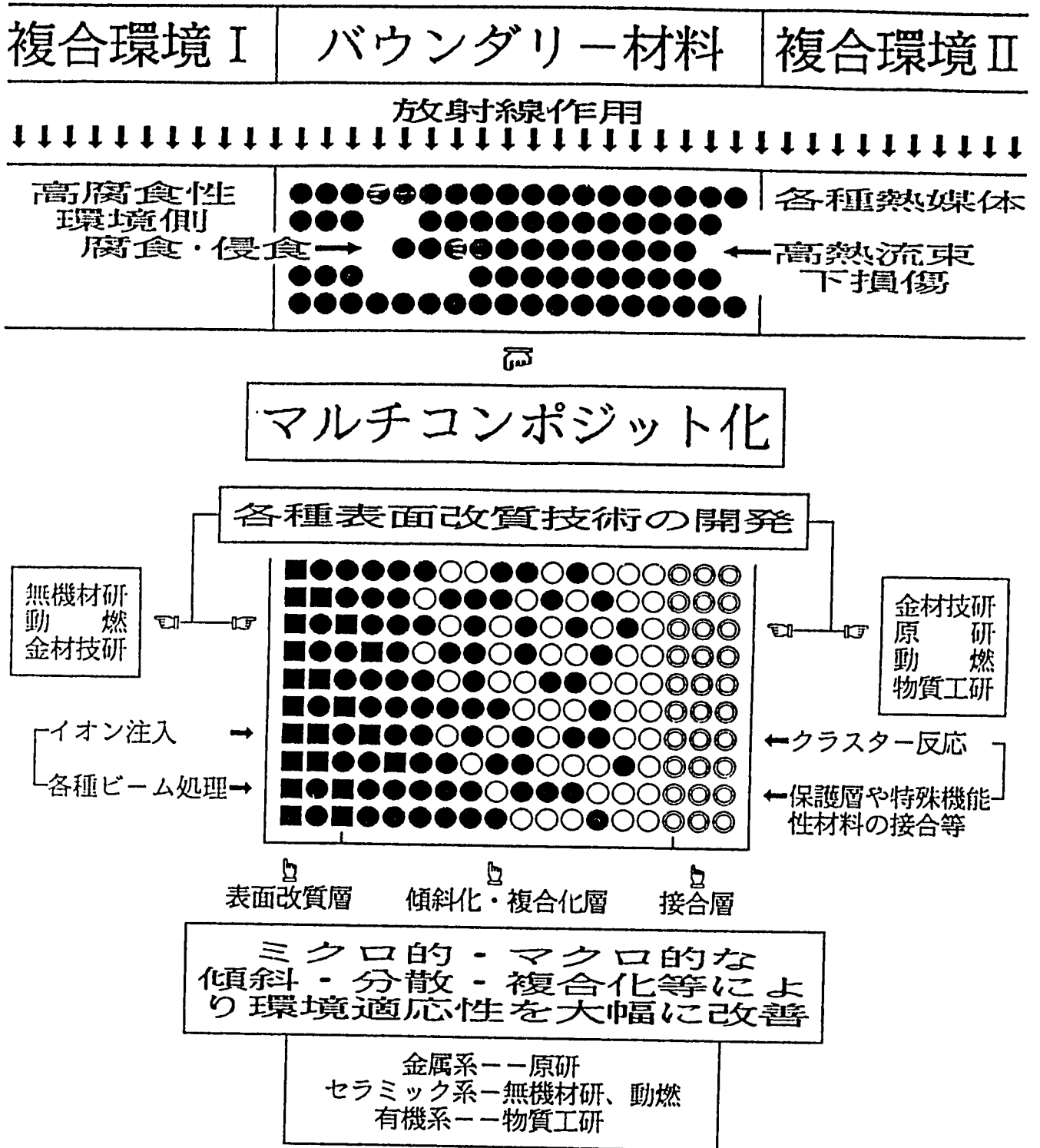


図6.2 複合環境用MCMの開発における主要研究開発項目及び各実施機関の研究分担項目

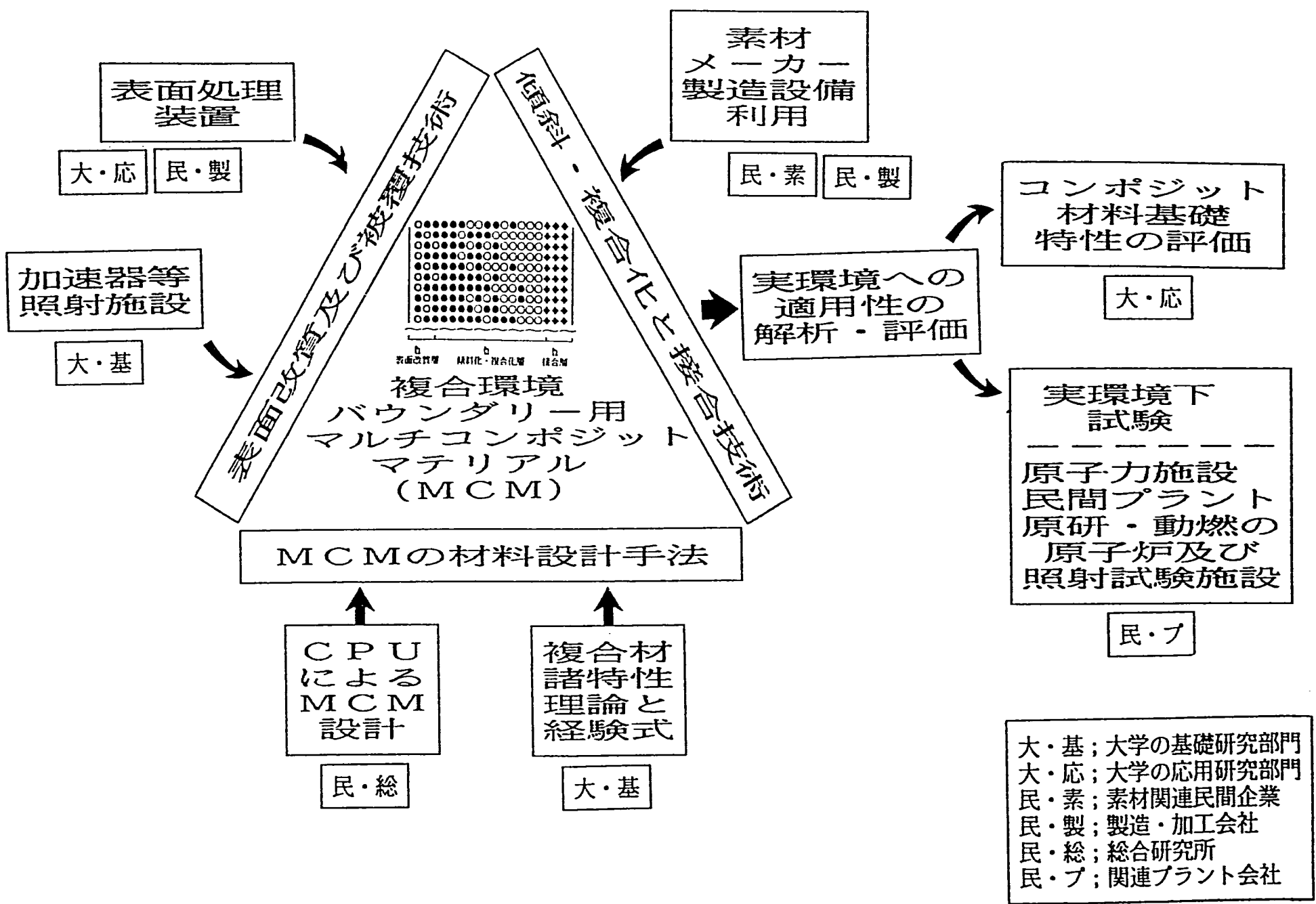


図6.3 原子力用第Ⅱ期クロスオーバー研究の研究協力体制に関する概念図

6. 2 動燃の第Ⅱ期研究計画

(1) 研究目的

新型プラントの高性能化（高温化、高耐食性化、耐放射線化、長寿命化、高機能化、高信頼化等）を最終目的とし、複合環境高温ナトリウム、高速中性子、中性子・ γ 線複合環境、放射線腐食環境、核燃料、高熱応力場等の複合環境）に適用可能な、バウンダリー用マルチコンポジット材料の創製のため、材料設計を行うとともに、複合化技術と接合技術を開発する。また各種材料の高性能化のため、表面改質技術を開発する。併せて、創製した新素材および表面改質材の高速炉複合環境への適用性を評価する。以下に、具体的な研究の目的と内容を示す。

- (A) 新型セラミックスコンポジットの創製： ナトリウムに対し粒界腐食を生ぜず、高温強度、破壊靱性、耐放射線性に優れた新型セラミックスコンポジットの創製のため、腐食・破損・照射損傷評価と機構の解明、これらに基づく改良方策の探索・確立、新素材の材料設計および複合環境での適用性評価を行う。さらに、金属等との接合技術の開発を行う。
- (B) 新型傾斜組成コンポジットの創製： 熱応力を飛躍的に緩和する傾斜組成コンポジットの創製のため、計算機シミュレーションにより、新たな成分系のセラミックス系新素材の熱的・機械的材料特性最適化のための材料設計を行うとともに、傾斜化・ナノコンポジット化・マイクロキャプセル化等の微細組織構造制御による複合化プロセスの開発、腐食・破損・照射損傷評価と機構の解明、これらに基づく改良方策の探索・確立と複合環境での適用性評価を行う。さらに、金属等との接合技術の開発を行う。
- (C) 遮蔽用透明コンポジットの創製： 高次化Pu燃料およびTRU含有燃料の製造設備で不可欠となる強力な γ 線と中性子線を同時遮蔽し、透明度に優れた遮蔽用高性能透明コンポジットを創製するため、材料設計、複合化プロセスの開発、基本特性評価、遮蔽特性評価と複合環境での適用性評価を行う。
- (D) 表面改質技術の開発： 各種のセラミックス、ステンレス鋼、フェライト鋼、耐熱合金等の表面近傍への各種イオン、レーザー、電子線等の注入・照射と各種の表面処理・熱処理等との微細組織構造制御による表面改質技術を開発し、粒界等の不均質性の除去、欠陥等の消滅および残留引張応力の低減または圧縮応力の導入による、各種材料のナトリウムに対する耐食性の改善と強度・延性、破壊靱性、耐放射線性の大幅な向上を図る。また、材料表面物性の変化から期待される新機能の発現に関する研究を行う。

(2) 研究工程および研究協力体制

動燃大洗工学センターで実施しているフロンティア材料研究のすべての研究テーマに関するマスタースケジュールを表 6.3 に、これら研究テーマの目的、対象材料および適用箇所を表 6.4 に示す。また、表 6.5 にはこれらの研究テーマのうちクロスオーバー研究の対

象となっている研究テーマの詳細工程を示す。

図 6.4 にはクロスオーバー研究第Ⅱ期計画の概念図を研究協力体制と併せて示す。

複合環境用マルチコンポジットマテリアルの開発
 (複合環境用セラミックス系マルチコンポジットマテリアルと表面改質技術の開発)
 動燃事業団

放射線腐食性が著しく異なる複合環境のバウンダリー用セラミックス系新材料を、傾斜・複合化及び接合の手段により創製

メカニカルアロイ、スラリー法、HIP、ナノコンポジット化、マイクロキャプセル化の手段により組成、組織と共にセラミックス等の異種材を傾斜・複合化及び接合

各種ビームの注入・照射による表面改質技術を開発し、耐食性、破壊靱性、強度・延性、耐放射線性に優れた高性能新素材を創製

各種イオン、レーザー、電子線の注入・照射による表面改質技術の開発による、耐食性、強度、照射特性の飛躍的改善

150-

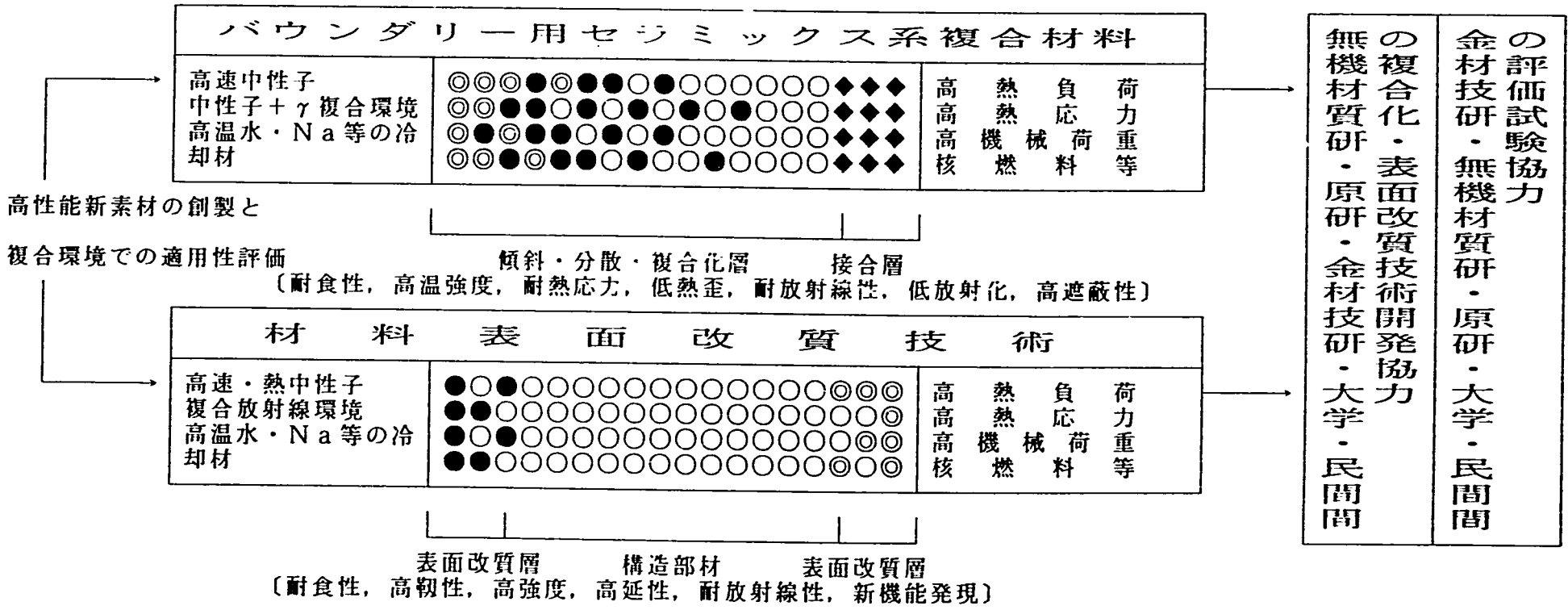


図 6.4 クロスオーバー研究第Ⅱ期計画の概念図および研究協力体制

表 6.3 研究テーマおよびマスタースケジュール

研究テーマ	元年度	2年度	3年度	4年度	5年度	6年度	7年度	8年度	9年度	10年度	11年度	
高性能制御材		プロセス開発、特性評価			▲終了							クロスオーバー 研 究 動燃 原研 金材研 無機材研 物質研 大学 メーカー 動燃/豊橋技科大 共同研究 動燃/金材研/ 原研 共同研究
新型セラミックス		Na耐食性改善方策検討				耐食性・強度・照射特性 適用性評価、接合技術						
傾斜機能材		材料設計手法、プロセス検討				プロセス開発、特性評価 適用性評価、接合技術						
高性能遮蔽材		プロセス開発、特性評価			▲終了							
高性能透明遮蔽材					新規	透明遮蔽材プロセス開発、特性評価						
表面改質技術					新規	改質技術開発、耐食性・強度評価						
耐熱合金		材料設計、試作、評価				Li耐食性・強度評価、適用性評価						
データフリーウェイ (分散型材料データベース)		基本システム整備、データ入力			一次選定△	二次選定△ 利用技術開発、利用拡大、データ拡充						

表 6.4 フロンティア材料研究の目的・適用箇所・関係機関

研究テーマ	目的	対象材料	適用箇所	関係機関
新型セラミックス	低摩擦・耐摩耗、熱応力緩和、 高遮熱化、高耐食性化	エンジニアリングセラミックス等	接触・摺動部、タービン付、排出口 TRU 燃料用セラミックス材料等	クロスオーバー研究 材料研究交流委員会 動燃 原研 金材研 無機材研 物質研 大学 メーカー
傾斜機能材	熱応力緩和、高耐食性化	セラミックス/セラミックス 金属/金属、セラミックス/金属	新型炉内、燃料サイクル施設の 熱応力緩和材、被覆管等	
高性能透明遮蔽材	透明遮蔽材の高性能化 被爆低減・高能率化	中性子 γ 線遮蔽成分複合材	MOX, 高次化Pu燃料, TRU燃料製造 設備、各種放射線環境等	
材料表面改質技術	イオン注入等のビーム利用による耐食性・ 強度・破壊靱性の改善、新機能の発現	セラミックス、ステンレス鋼 フェライト鋼、耐熱合金等	新型炉内、燃料サイクル施設の 構造材料・機能材料等	
耐熱合金	高温液体金属利用技術のフロンティア 領域の開拓 (Li, K)	Nb基、Mo基合金	新型炉内、燃料サイクル施設の構造 材料、各種ビーム用ターゲット材料等	動燃/豊橋技科大学 共同研究
データフリーウェイ	分散型ネットワーク方式材料データベース 構築	フロンティア材料研究データ等	材料設計・選択用、材料現象 解明用支援ツール	動燃/原研/金材研 共同研究

表 6.5 クロスオーバー研究対象テーマの詳細研究工程

研究開発スケジュール (書十画)

複合環境用マルチコンポジットマテリアルの開発 「複合環境用セラミックス系マルチコンポジットマテリアルと表面改質技術の開発」

項目		年度	当該評価対象期間				
			第1期計画 元年度～5年度	6年度	7年度	8年度	9年度
セラミックス系マルチコンポジットの創製	新型セラミックス コンポジットの創製	従来材の耐食性 評価、耐食性改良 方策の探索、 強度試験法確立	←改良方策の抽出→ ←新型材の試作、耐食性評価→ ←短時間強度評価→	←改良方策の絞り込み→ ←新型材の試作、Na中試験→ ←クリープ強度評価→ ←中性子照射試験→	←改良方策確立→ ←耐食性評価→ ←クリープ強度評価→ ←中性子照射損傷解析評価→	←改良方策確立→ ←接合法開発予備試験→ ←接合法開発試験→	←複合環境での適用性評価→ ←接合法開発試験→ ←腐食・破壊・損傷機構検討→
	新型傾斜組成 コンポジットの創製	FINASによる熱応 力・変形解析、 最適材料設計手法 の確立、製造プロ セス予備検討	←複合化プロセス改良方策の探索→ ←傾斜複合化プロセス検討→	←改良方策の絞り込み→ ←傾斜複合化プロセス改良→ ←耐食性・短時間強度評価→ ←中性子照射試験→	←改良方策の絞り込み→ ←傾斜複合化プロセス改良→ ←クリープ特性評価→ ←中性子照射損傷解析評価→	←複合化プロセス確立→ ←接合法開発予備試験→ ←接合法開発試験→	←複合環境での適用性評価→ ←接合法開発試験→ ←腐食・破壊・損傷機構検討→
	遮蔽用透明 コンポジットの創製	新規	←複合化プロセス開発 予備検討→ ←透明遮蔽材の材料設計 ・試作→	←複合化プロセス開発 改良方策の探索 試作材の基本特性評価→	←複合化プロセス確立 改良方策の絞り込み 試作材の基本特性評価→	←遮蔽性能評価・複合環境での 適用性評価→ ←中性子/γ線遮蔽実験→	←複合環境での適用性評価→ ←接合法開発予備試験→ ←接合法開発試験→
表面改質技術による 高性能新素材の創製		新規	←ビーム種類・注入条件の予備検討→ ←耐食性改善の予備検討→	←耐食性改善の見通し→ ←引張・破壊じん性子備検討→	←ビーム注入条件の改善→ ←耐食性評価→ ←引張・破壊じん性向上の見通し→ ←クリープ特性予備検討→	←ビーム注入条件の最適化→ ←最適ビーム条件における耐食性評価→ ←最適ビーム条件における引張・破壊じん性評価→ ←最適ビーム条件におけるクリープ特性評価→	←表面改質技術基盤の確立→ ←中性子照射試験準備→ ←中性子照射試験→

7. まとめ

本クロスオーバー研究第 I 期計画（平成元年度～5 年度）を推進した結果、以下に示す成果を得た。

研究計画および研究成果の審議および研究の効率的推進に役立てるため、動燃は幹事機関として、原研と交互に、材料研究交流委員会 10 回、研究会 8 回、勉強会 3 回、国内シンポジウム 2 回、国際シンポジウム 1 回、仏・独・伊・蘭の 5 研究機関とのワークショップの開催および国内研究機関の訪問調査を行った。これらの研究交流を通じた、外部の専門家との交流、新素材に関する最新情報の収集、試料の入手、共同研究の遂行等は、動燃の研究テーマの効率的推進に大変役立った。これらの研究交流により、動燃の研究テーマに関して以下のような成果を得た。

- ①新型セラミックス： 焼結法による既存の各種セラミックス (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC , SiC_3N_4 , Sialon 等) を対象に 550 °C および 650 °C で最長 4,000 時間の Na 中腐食特性を評価し、優先的に粒界の腐食が進行し、耐腐食性を向上させるためには粒界の組織・構造制御が不可欠であることを明らかにした。これらの成果を踏まえて新型セラミックス素材を試作・評価し、一部のセラミックスについて、耐食性に優れた新型セラミックス創製の見通しを得た。
- ②傾斜機能材： PSZ/SUS 系 FGM の各種物性値を組織および温度の関数として定式化し、高温度落差場及び高熱流束環境下における非定常・弾塑性解析を行った。高温度落差場においては遮蔽性重視型 FGM が、高熱流束環境下においては熱伝達性能重視型 FGM が熱応力緩和の点で有利であることを明らかにし、最適材料設計手法を確立した。MA/ 真空プラズマ焼結法、スラリー法等により円盤状および円筒状 FGM の製造プロセスの予備的検討を行った。
- ③高性能遮蔽材： 中性子遮蔽材用金属水素化物として高温安定性の評価を行い有望成分を選定するとともに、収納材料表面への水素バリアー材の被覆処理方法の検討を行い、カロライズ処理が優れていることを明らかにした。また、高速中性子遮蔽、熱中性子遮蔽、中性子と γ 線の同時遮蔽の必要な放射線環境を想定し、耐熱性の確保に留意して材料設計を行い、放射線の種類、強度、エネルギーに応じ、自在に遮蔽材の成分を変化させるため、粉末冶金法による一体成形プロセス条件の検討・最適化を行い、高性能遮蔽材創製の見通しを得た。
- ④高性能制御材： B_4C / 金属複合材、ホウ素化合物、 B_4C / SiC ウィスカー等のペレット製造プロセス条件の最適化を行った。これらの試作材について熱伝導率、硬さ、熱衝撃特性の評価を行い、従来材の B_4C より耐割れ性が優れ長寿命な新型中性子吸収材創製の見通しを得た。

これらの研究成果は、材料研究交流委員会により、中間研究評価および事後研究評価を受け、研究目標・対象が優れており、かなり挑戦的な目標にあってもしかるべき成果を得て、材料開発に関する幾つかの基盤技術が生まれているとの評価を得た。

さらに、6年度からの第Ⅱ期5ヶ年計画を中核5機関で立案し、材料研究交流委員会および科学技術庁関係者との調整を経た後、材料研究交流委員会および外部の評価者を含む社内の事前研究評価を受けた。その結果、研究目標、研究内容、研究スケジュールとも妥当との評価を受け、6年度からの研究の実施が認められた。

本クロスオーバー研究を通じて、一部の新素材について創製の見通しを得るとともに、関連する基盤技術を生み出すことができた。クロスオーバー研究制度が発足して以来、これまで5年間の研究交流の間には、研究機関間の性格の違い、研究環境・風土の違い、研究に対する興味守備範囲の違い等乗り越え、研究の効率的・効果的推進のために、本制度は有効に作用したと思われる。そのため、6年度からの第Ⅱ期研究計画の実施においては、本制度を更に有効かつ円滑なシステムに変え、研究交流に一層役立てることが望まれる。

なお、第Ⅰ期研究成果を内外の専門家と討論するため、第2回国際シンポジウムの開催が予定されている。

最後に、本クロスオーバー研究を円滑かつ効率的に実施でき、当初、目標とした研究成果が得られたのは、多大の研究協力をいただいた材料開発室、ADSおよびMMSの関係者のおかげであり、ここに感謝の意を表します。

原子力用材料研究交流委員会委員名簿

1 主査	岡本 眞實	東京工業大学 原子炉工学研究所	教授
2	衛藤 基邦	日本原子力研究所 東海研究所 高温工学部 熱エネルギー材料研究室	室長
3	大塚 俊明	名古屋工業大学工学部 応用化学教室	助教授
4	岡田 孝継	(株) 東芝 原子力材料化学技術部	主幹
5 幹事	加納 茂機	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 技術開発部 先進技術開発室	主任研究員
6 幹事	木内 清	日本原子力研究所 東海研究所 材料研究部 界面工学研究室	室長
7 事務局	北島 正弘	金属材料技術研究所 第2研究グループ 第1サブグループ	サブグループリーダー
8	小林 慶規	物質工学工業技術研究所 計測化学部 状態分析研究室	主任研究官
9	新野 仁	金属材料技術研究所 表面界面研究部	主任研究官
10	杉本 克久	東北大学工学部 金属工学科	教授
11	瀬口 忠男	日本原子力研究所 高崎研究所 材料開発部 極限材料研究室	室長
12	田村 学	日本鋼管株式会社 総合材料技術研究所 第二金属材料研究部	部長
13	谷 賢	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 技術開発部 先進技術開発室	室長
14	中澤 崇徳	新日本製鉄(株) 鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部	主幹研究員

- | | | | |
|--------|-------------------------|---|------------|
| 15 | 野田 哲二
(平成元年度) | 金属材料技術研究所
第2研究グループ 第3サブグループ | サブグループリーダー |
| 16 | 橋本 素行 | (株)日立製作所 エネルギー研究所
第3部 304ユニット | 主任研究員 |
| 17 | 服部 滋
(平成4年度まで) | 化学技術研究所 | 首席研究官 |
| 18 | 姫野 嘉昭
(平成2年度から4年度まで) | 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター
技術開発部 フロンティア技術開発室 | 室長 |
| 19 | 三橋 武文 | 無機材質研究所
第7研究グループ | 総合研究官 |
| 20 | 森 久起
(平成元年度) | 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター
技術開発部 フロンティア研究グループ | 主幹 |
| 21 | 米澤 利夫 | 三菱重工業株式会社 高砂研究所 | 主査 |
| (五十音順) | | | |
| 調査運営担当 | | | |
| | 角田 弘和 | 三菱総合研究所
安全工学研究部 原子力第二室 | 室長 |