

NRIM NEWS



文部科学省 金属材料技術研究所

National Research Institute for Metals



研究最先端

- 安定な2元素準結晶合金の発見
- 金属イオンの毒性発現メカニズムを探る
— 一体にやさしい材料の開発のために —

ワークショップ報告

- 第5回 超鉄鋼ワークショップ開催報告
- 第1回 資源循環型社会構築のための新世紀構造材料研究
ワークショップ開催報告



3

2001 MARCH

非周期系物質・材料研究チーム
蔡 安邦

安定な2元素準結晶合金の発見

準結晶は1982年に発見された新しい物質です。それまで、金属や合金のような物質の原子構造は、結晶かアモルファスのいずれかであると考えられていました。従って、この物質は結晶でもアモルファスでもない第3の構造をもった画期的な物質です。最初の準結晶は金属液体を一秒間で百万度の冷却速度の急冷方法で作製されました。このような準結晶は不安定で少し温度を上げると、結晶になってしまいます。最近になって、僅かながら一部の合金において準結晶が安定に存在することが発見されました。つまり、これらの安定な準結晶では一般の結晶と同じように、液体状態からゆっくり冷却しても準結晶がつくれます。従って、大きな粒の準結晶をつくることができました。

しかし、すべての安定な準結晶は例外なく、3つ以上の元素から構成されます。従っ

て、安定な準結晶には必ず3つの元素が必要なのは、証明されていないが、常識として一般的に受け入れられています。準結晶は構造自身が複雑な上に、3つ以上の元素から構成されるため、その結晶構造および物性への理解を難しくしています。金属材料技術研究所の非周期物質材料研究チームは、初めて二つの元素のみで安定な3次元準結晶が形成されることを発見しました。この安定な準結晶はCdとYbとの二つの元素を適当な組成に配合して、溶解すれば簡単に作れます。二つの元素で準結晶が作れることは、適当な第3元素を加えて、無数の準結晶が作れることを意味し、準結晶の研究に大きく道が広がることが予想できます。それ以上に重要なのは、二つの元素から構成され、準結晶の安定性に対するエントロピーの寄与が三元素の準結晶に比べてかなり小さくなることです。従って、準結晶の構造と熱

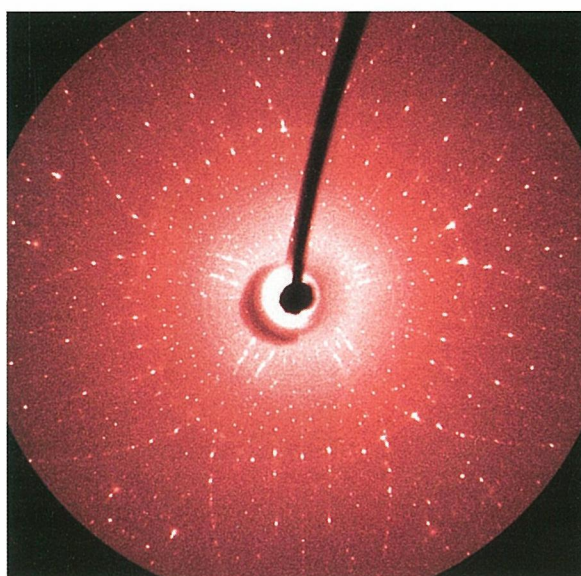


図1 2元素Cd-Yb安定な準結晶から撮影したX線透過ラウエ回折パターン

力学的な安定性との研究について新しい道が拓かれるに違いありません。さらに、準結晶の構造解析あるいは物性の理論計算がかなり単純化され、準結晶に対する理解が飛躍的に進むことが予想されます。

図1はこのような二元素の準結晶の単粒(約0.2mm) 5回対称軸から撮影した透過ラウエ写真です。花びらのよう5回対称パターン、3つの円からなる3回対称パターンと2回対称パターンが見られます。各パターンの間の方位関係から、準結晶は20面体対称性を有することが明かとなりました。また、多くの鋭い回折斑点が規則正しく配列していることから、この準結晶の単粒はかなり良質であることが分かりました。実はこの安定な二元素準結晶は準結晶の発見の前に(1972年)すでに調べられていましたが、非常に大きな格子定数を持った化合物であると結論されていました。図2に示すようにCd-Ybの相図においてCd₆Yb化合物のすぐ隣に存在しているCd_{5.7}Ybという未知相は今回

発見された安定な準結晶です。一方、Cd₆Ybは既知の化合物相であり、その構造を詳細に検討した結果、局所構造が準結晶に非常に似ていることから、Cd_{5.7}Ybは準結晶であることに確信が得られ、二元素安定な準結晶の発見に至りました。さらに、相図の類似性から、同じ未知相とされていたCd₁₇Caも準結晶であることを発見しました。

もう一つ興味をもたれるのは、これらの準結晶が対称性の低いクラスターから構成されることです。何故このような対称性の低いクラスターで広い範囲にわたって準結晶構造を作り上げるのかは今後の課題です。また、この事実は準結晶の構造の多様性を示し、準結晶の構造をもっと広汎に考えなければならぬことを意味します。また、結晶と同じように、構成元素と構造が異なると、違う物性の出現も予想され、準結晶研究が多角的に展開することが大いに期待されます。

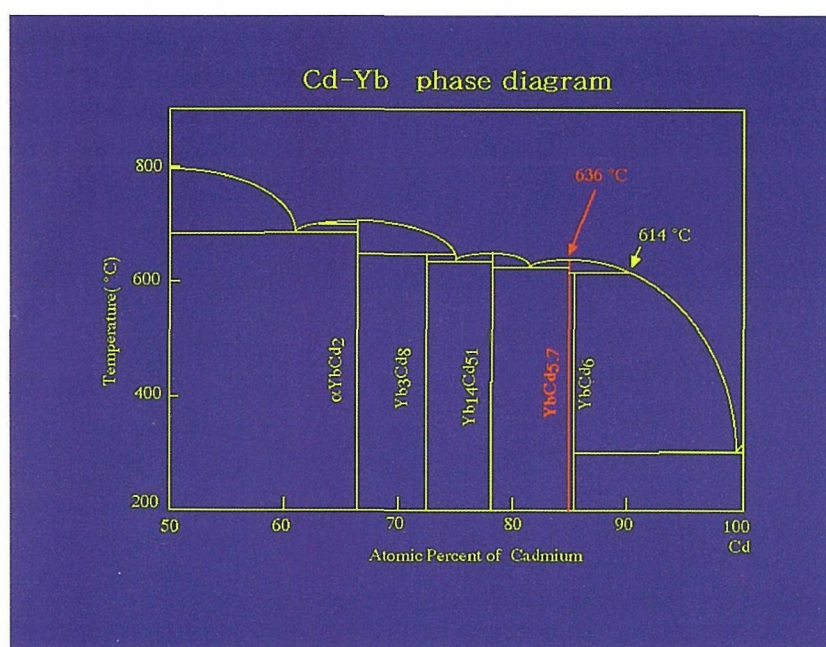


図2 Cd-Ybの2元状態図

金属イオンの 毒性発現メカニズムを探る — 一体にやさしい材料の開発のために —



生体融和材料研究チーム
山本 玲子

生体材料とは、老化や事故、病気などで人体に生じた欠損部分の機能と形態を修復するために、体内に埋め込んで使用される材料です。現在、金属系の生体材料としてはSUS316Lステンレス鋼、コバルトクロム合金、チタン合金等が、人工関節、人工骨、骨折固定材、人工歯根等に使用されています。しかし、これらの材料は元々工業用に開発されたものであり、生体適合性や体内での耐食性・耐久性は必ずしも十分とはいえません。特に、生体に対して無毒である、つまり癌・奇形・アレルギー・炎症などを起こさないことは、生体材料にとって最も重要な条件です。生体適合性に優れた金属材料を開発するためには、材料を構成する金属元素の毒性についての体系的な評価が不可欠です。

従来、材料の生体に対する毒性は動物実験により評価されてきましたが、最近では動物やヒト由来の培養細胞を用いた細胞毒性試験が、費用や時間がかかりかからず再現性に優れていることから、盛んに行われています。金材技研でも、マウス及びヒト由来の細胞を用いて、43種類の金属イオンの細胞毒性評価を行ってきました。金属イオンの細胞毒性は、最も強いイオンと最も弱いイオンでは $10^4 \sim 10^5$ 倍違います。毒性が強いイオンとして、 Cd^{2+} 、 V^{3+} 、 Ag^+ 、 Hg^{2+} 、 Sb^{3+} 、 Cr^{6+} 、 Be^{2+} 、 In^{3+} が、毒性がやや強いイオンとして、 Hg^+ 、 Tl^{3+} 、 Ga^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Sn^{2+} などがあげられます。また、金属イオンの細胞毒性は細胞の種類には関係なく、ある細胞にとって毒性の強いイオンは、他の細胞にとっても毒性が強い傾向があることがわかりました。

上記の結果は、金属イオンが細胞増殖に及ぼす影響を調べて得られたものです。細胞にとって、増殖するということは最も基本的な機能の一つであり、ほとんど全ての細胞に共通した機能でもあります。では、細胞が増殖するとき、細胞はどのようなプロセスを経るのでしょうか？

一般に、細胞は細胞周期（図1）と呼ばれるサイクルを巡っています。細胞周期は大きく4つに分類

されます。細胞が2つに分裂するM期、DNAを合成するS期、そして両者の間を埋めるG1期、G2期です。細胞は増殖するために、 $\text{G1} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{G2} \rightarrow \text{M} \rightarrow \text{G1}$ という順序で規則正しく細胞周期を繰り返していきます。この順序は厳密に守られており、決して逆向きに進行することはありません。ヒトの細胞で、1細胞周期に30時間くらいかかり、その時間配分は図中に示した通りです。

では、金属イオンは細胞周期のどの部分に作用するのでしょうか？ フローサイトメータという装置を使って調べた結果について、以下簡単に紹介します。

フローサイトメータとは、細い管を通して細胞を一個ずつ滴下し、そこにレーザー光を当て、細胞によって散乱した光や、細胞が発する蛍光を測定することにより、個々の細胞に関する情報を得るための装置です。細胞内のDNAをあらかじめ蛍光色素で染めておくことにより、個々の細胞が持っているDNA量を測定することができます。細胞内のDNA量は細胞周期の中の各期ごとに異なるので、これにより、個々の細胞がどの期にいるのかを知ることができます。

図2(a)はヒト由来の細胞を用いた測定結果の例です。G1期の細胞は一組の染色体（ヒトでは22対+

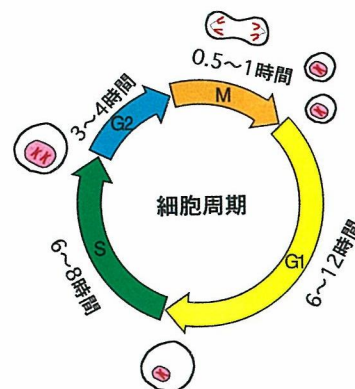


図1 細胞周期を示した模式図

細胞は細胞周期を繰り返しながら分裂、増殖している。G1期、G2期ではそれぞれDNA複製、細胞分裂の準備をしていると考えられている。

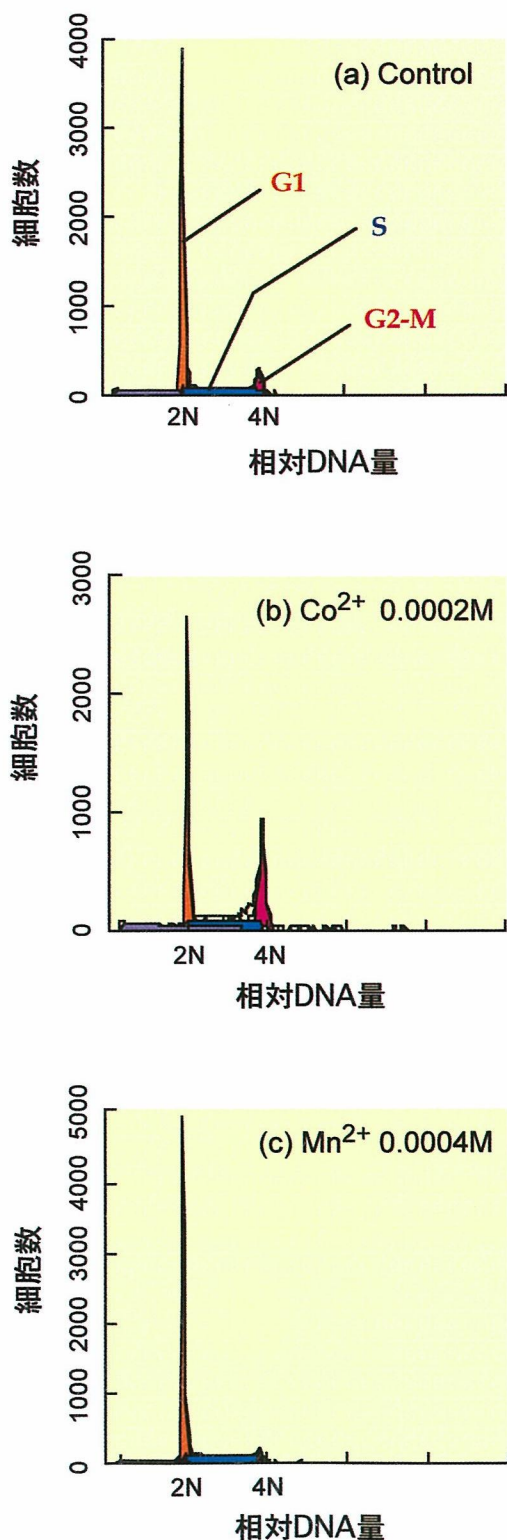


図2 金属イオンが細胞周期に及ぼす影響
(a)金属イオン未添加、(b) Co^{2+} イオン0,0002M添加、
(c) Mn^{2+} イオン0,0004M添加。

性染色体2本、2Nと表す)を有していますが、S期を終了した分裂前の(G2期およびM期)の細胞は、G1期の細胞の2倍のDNA(4N)を有しています。S期の細胞はDNAを複製している最中なので、そのDNA量はG1期の細胞とG2・M期の細胞の間の値となります。多くの細胞について測定した結果を蓄積することにより、細胞集団全体で何%の細胞がどの期にいるのかがわかります。

金属イオンを添加した場合と添加しない場合の、各細胞周期にいる細胞の割合を比較することにより、金属イオンが細胞周期に及ぼす影響を調べることができます。図2(b)及び(c)はその結果の一例です。 Co^{2+} イオンを0.0002M添加した場合(b)では、金属イオンを添加しない場合(a)と比較して、G2・M期の細胞の割合が増加していることがわかります。このことは、 Co^{2+} イオンにより細胞周期がG2期からG1期の直前までの間で停止してしまったことを示唆しています。つまり、 Co^{2+} イオンは細胞の分裂機能を阻害している可能性があります。一方、 Mn^{2+} イオンを0.0004M添加した場合(c)では、金属イオンを添加しない場合(a)と比較して、G1期の細胞の割合が増加していることがわかります。このことは、 Mn^{2+} イオンにより、G1期内でS期に入る前に細胞周期が停止してしまったことを示唆しています。

このように、金属イオンが細胞周期に及ぼす影響を調べることによって、金属イオンがどのようにしてその毒性を引き起こすのかを知る手がかりが得られます。毒性発現のメカニズムがわかると、金属イオンがヒトに及ぼす影響をより正確に予測できるようになると考えられています。というのは、動物を用いた毒性試験の場合、どうしてもヒトとの種の違いが問題になります。しかし、個々の金属イオンの毒性発現メカニズムがわかっているならば、動物の体や細胞を用いて得られたデータがヒトに当てはめられるかどうか、判断できるようになるのではないかと期待されているからです。

また、メカニズムがわかれば、ヒトへの毒性データから逆に、他の生物への影響を予測することも可能になるかもしれません。金属イオンの毒性についての基礎的なデータを積み上げていくことにより、体にやさしい材料の開発に寄与することは勿論、環境にやさしい材料の開発の一助となることを目指して、研究を進めています。

ワークショップ報告

第5回超鉄鋼ワークショップ



評価ステーション

高橋 稔彦



基調講演会

標記ワークショップを去る1月17、18日の両日つくば国際会議場で開催しました。超鉄鋼材料研究1期計画も余すところ1年となりましたので、1期成果を総括し、2期展望を討論することを趣旨に「超鉄鋼材料：確かな手応え、新たな展開」と題して開催しました。今年も参加者は500名を超え、そのうち実にユーザー側の研究者・技術者が外部参加者の40%に達しました。超鉄鋼ワークショップが「明確な主題」を構え、「シーズ」と「ニーズ」をミートさせる場として、講演発表を主とする学会とは異なる意義を持つことの認識が広まってきたことが実感されました。この交流の場のさらなる発展を期待するという嬉しい声をユーザー・メーカー双方の研究者からいただきました。海外の参加者も「研究要素討論会」の6名、ポスターセッションの4名をはじめ40名近くに達し、また接合関係の討論会のプロシーディングスが昨年に引き続き今年も国際的な学術誌に特集掲載されることが決まるなど、国際的な広がりも着実に進んできました。

基調講演では、鉄鋼材料のメーカーの立場から奥村(以下敬称略)(新日鐵)、ユーザーの立場から竹田(三菱重工、現三菱総研)

が20世紀を総括し、21世紀において地球的な立場で鉄鋼材料研究が解決すべき課題が提示されました。さらに研究のスピードアップが一段と重要となり、このために産学官の連携の強化および基礎研究の革新と深化が重要であると指摘されました。高木(九大)は、これに応じて、鉄鋼材料技術の中心課題である「細粒化研究」に新たな局面が開けつつあるという希望に満ちた研究展望を行いました。佐藤(金材技研所属は以下所属略)は、超鉄鋼研究の1期を総括し、実用化を目指す2期研究の基礎固めが着実に進んでいることを紹介しました。

技術討論会では、シーズの実用化技術への展開にむけて2期研究をいかに進めるかについて熱のこもった討論が行われました。80キロ鋼討論会では、ガスパイプラインを対象に、南(阪大)の司会で町田(千葉大)、川西(大阪ガス)が必要性能、鳥塚と川口が超細粒鋼の母材と継手特性を紹介して実用化上の課題抽出の討論を行いました。材質、溶接技術、評価等の課題を具体的に理解することに成功するとともに、ケーススタディー討論の有効性を認識しました。150キロ鋼討論会では、家口(神鋼)の司会で、自動車部品とその製造技術の今後の動



技術討論会



懇親会

向が尾谷(日産自)と野村(愛知製鋼)から紹介され、津崎が「遅れ破壊と疲労に強い新マルテンサイト鋼」の研究状況を紹介しました。本鋼の持つ大きな可能性が確認され、部品化技術開発への様々な期待が語られました。耐熱鋼討論会では、クリープ、熱疲労などの要素技術の研究から、2期はプラントを想定した研究へ進むことを念頭において、解決すべき課題を洗い直すことを目的に、司会・時政(近畿大)、話題提供・寺前(東電)、島川(川重)、緒方(電中研)、田淵で行い、厚肉化に伴う熱疲労の克服の重要性が再認識されました。耐食鋼討論会では、篠原(東大)の司会のもとに、園家(IHI)、前田(日揮)、檜野(建築研)、守屋(土木研)、山本(新日鐵)、柴田(阪大)から提供された構造物の腐食寿命とライフサイクルコストに関する内外の調査結果などの情報をもとに、1期研究で得られたシーズ技術の展開方向を探る討論が行われました。

研究要素討論会では、鉄鋼材料研究の革新を目指す「ナノテクノロジーと鉄鋼材料」は司会：大塚(融合研)、杉山(新日鐵)、川嶋(東北大)、中山(神鋼)、話題提供：Olson(North Western Univ. 米)、宝野、山田、辻(阪大)、Unwin(Univ. Warwick 英)、升田、早川、宮原で行われ、米国のナノテクノロジーの「Steel Research Group」の詳細などが紹介されました。21世紀の接合技術の展開を考える「溶接・接合技術の新

展開」では牛尾(阪大)の司会で、松縄(阪大)、Koçak(GKSS Res.Center独)、David(Oak Ridge 米)、平岡、塚本からレーザー溶接および溶接現象のモデリングを中心議題に欧米日の最新の研究成果が紹介されました。クリープ特性向上の新コンセプトを討論する「長時間クリープ強度向上と組織安定化の新たな方向性」では、丸山(東北大)の司会で、Foldyna(Vitkovice、チェコ)、Cerjak(Technical Univ. Graz、オーストリア)五十嵐(住金)、木村、堀内が話題提供し、組織安定化技術の今後の展開に原子・ナノレベルの解析が不可欠であるとの認識が日欧で共有されました。このように21世紀を迎えて鉄鋼研究アプローチも大きく変革しつつあることが実感されました。

ポスターセッションは120件の多きに達しましたが、うち実に51件が外部からの発表でした。多くの関連成果が一堂に公開され、時間をかけて議論できる場としてご利用いただけるようになったものと喜んでおります。

最後に初の試みとして、パネルディスカッション方式で総括討論会を持ちました。長井が2期を展望し、続いて潮田(新日鐵)、関(神鋼)、木原(IHI)、新田(電中研)、水流(東工大)、南(阪大)から、「国家戦略・人類的課題解決への明快なシナリオ作り」、「国立研究所が行う実用化を目指す基礎研究のモデル作り」、「使われてこそ材料である」を基調としたコメントが行われました。期待の大きさと責任の重大さを噛みしめる討論会となりました。私たちは、今回いただきました様々なご意見を2期計画に反映させてまいります。また、上に述べましたワークショップの意義を一段と発展させるよう、企画に知恵を絞ってまいります。最後に、発表者、司会者の皆様、そして遠路お運びいただき活発に討論に参加いただきました皆様に心より感謝申し上げ、第5回超鉄鋼ワークショップ開催の報告とさせていただきます。

ワークショップ報告

第1回 資源循環型社会構築のための
新世紀構造材料研究
ワークショップ開催報告材料創製ステーション
梅澤 修

産学官が連携した資源循環性の高い製品並びにその生産過程の開発が政府に提言され、資源循環型社会実現に向けての各種取り組みが重要視されている中、スクラップのリサイクル問題が顕在化しつつあります。すなわち、リサイクルプロセスにおける不純物除去コスト高と高い環境負荷、廃棄物減量（処分地の確保）などであり、これらの問題点を解決する技術開発が緊急の課題となっています。政府は、省庁横断的な取り組みと官民連携を基本とした「経済新生特別枠・ミレニアムプロジェクト」を平成12年度より発足させ、「環境」を一つのキーワードとして取り上げました。当研究所においても、本プロジェクトの一環として、「資源循環型社会の実現に資する環境負荷を低減する物質・材料に関する調査研究」、および関連プロジェクト「資源循環型新世紀構造材料の研究（リサイクル鉄の超鉄鋼化研究）」を推進しています。

当研究所では、ミレニアムプロジェクト関連の研究内容を公開し、広く議論を行うために、第1回 資源循環型社会構築のための新世紀構造材料研究ワークショップ（平成13年1月23日（火）、於：金属材料技術研究所 第1会議室）を開催しました。本ワークショップは、村上陽一郎 教授（国際基督教大学）による基調講演「安全な社会造りを目指して」、鉄鋼を主たる対象に当研究所において取り組む研究プロジェクトの概要および平成12年度の研究成果の報告「リサイクル鉄の超鉄鋼化研究プロジェクト概要」、物質・材料およびそれらのプロセス技術に関する調査の中間報告「循環型社会における物質・材料技術に関する調査報告」、「環境低負荷型材料技

術開発に向けた研究方策」の各講演で構成され、21世紀を担う構造材料研究について議論が行われました。比較的少人数によるワークショップでありましたが、素材、自動車、電気、機械・重工等の幅広い分野から参加がありました。

各講演や質疑において、以下の内容がポイントとして挙げられます。

- （1）安全な社会造りを目指した社会意識の啓蒙が進められており、21世紀における技術開発を左右する大きなトレンドです。
- （2）不純物元素を積極的に活用するという逆転の発想、そして、溶製・凝固から加工熱処理と特性評価に至る金属組織制御という概念、に基づく材料創製技術の確立によって、現行技術で得られる回生材を原料とするリサイクル鉄の高強度化達成を図ります。
- （3）資源循環型社会構築を指向した物質・材料技術の北米における動向と、我が国における研究施策の違いは何か。
- （4）材料LCAを適用して材料の地球環境への負荷を定量的に解析することが必須です。そして、その基礎となる材料の製造時および原料の製造時の環境負荷解析データベース構築と手法解析の取り組みが進められています。

最後に、本ワークショップ開催にご協力いただいた関係各位に感謝申し上げますとともに、今後のプロジェクト推進とワークショップの継続開催にご助力賜ようお願い申し上げます。

表紙説明

平成13年2月22日に行われた研究発表会のバーチャルラボ体験ツアー。

■編集後記

今月号では、準結晶や生体材料あるいはまた超鉄鋼材料に関する話題が取り上げられています。これらの研究課題あるいは材料への取り組み方は、一昔前まではあまり予想できなかったものであり、材料研究における時代の移り変わりを感じます。

なお、今月をもってNRIM NEWS（えぬりむ）の発行は終了します。ご愛読ありがとうございました。

発行所 文部科学省金属材料技術研究所
〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1
TEL. (0298) 59-2045 FAX. (0298) 59-2049
ホームページ <http://www.nrim.go.jp>

通巻 第508号 平成13年3月発行
編集兼発行人 佐藤真輔
印刷所 前田印刷 株式会社