

© 1988 ISIJ

特別講演

金属系新素材研究の現状について

中 川 龍 一*

Current Status of Researches on Metallic New Materials

Ryuichi NAKAGAWA



このたび、栄ある西山賞を受賞し、誠に光栄に存じております。私を育てて下さいました諸先生、諸先輩並びに研究の遂行に当たってお世話になりました金属材料技術研究所の方々に厚く御礼を申し上げます。

私自身の研究活動を振り返りますと、昭和30年代後半に、長年行ってきましたオーステナイト系ステンレス鋼の研究から製鋼の研究へと大きく転換し、未来の製鋼技術を夢見て連続製鋼法の開発を手掛けてきました(写真1参照)。この時、鉄鋼協会のなかに連続製鋼研究委員会を作つていただくなど、多くの方々から力強いご指導をいただき、研究成果の一つとして、複雑な製鋼反応の分離とその効率化を得ることができました。この連続化及び反応の分離という考え方は近年の製鋼プロセスの種々の工程で実用化されており、国立研究所における研究が、鉄鋼界の発展にいくばくかの寄与をしたのではないかと思います。

ところで、最近私どもの研究所では、長期計画の改訂とこれに伴う研究組織の再編成を行いました。この際これからの材料科学技術のあり方について議論を重ねま

した。本稿ではこの考え方をご紹介して見たいと思います。

1. はじめに

近年の産業及び科学技術の発展には目覚ましいものがあるが、それに伴い、基盤としての材料に対する要求も著しく高度化している。特に、通信、情報、エネルギー、核融合、航空・宇宙開発、海洋開発などの先端科学技術分野で、飛躍的展開をもたらすような高性能材料の開発が強く望まれている。中でも、金属材料は最も基本的な構成材料であり、上記の先端科学技術分野でも中核となる材料であることから、新しい発展の引き金となる新特性・高性能を有する新金属材料の開発研究が世界的に活発化している。そこで、本稿では、今後の材料科学の進むべき方向を念頭に置きながら、金属系新素材研究の現状について、金属材料技術研究所で行われている研究を中心に紹介することにする。

2. 材料信頼性の確立

金属材料は機器や構造物の主要な構成材料であり、その使用途中で種々の原因によつて性能劣化を生じ、それが機器や構造物の故障や破壊事故につながると影響が非常に大きいため、その信頼性向上は極めて重要である。金属材料技術研究所では「見掛けは従来材料であつても、材料信頼性の確立された材料は新素材である」との信念のもとに、機器・構造物の設計や安全性の確保に貢献することを目的に、10万hクリープ試験を初めとして、各種構造材料のクリープ試験及び疲労試験に系統的に取り組み、これをデータシートとして公表してきた。

2.1 クリープデータシート

現在、41種類の鋼種について10万hまでのデータを取ることを目的に研究を進めている(表1参照)。2万

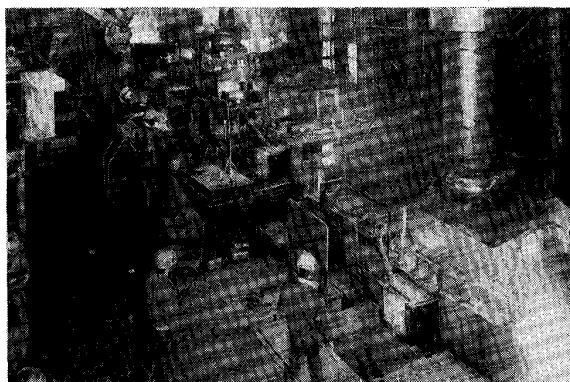


写真1 連続製鋼のモデルプラント

昭和63年3月本会講演大会における西山賞受賞記念特別講演 昭和63年5月18日受付 (Received May 18, 1988)

* 金属材料技術研究所所長 (Director General, National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

Key words : metallic new materials ; intermetallic compounds ; material reliability ; synthetic materials with specific structure ; rare metals ; materials design ; computational metallurgy.

表 1 金材技研クリープデータシート出版状況

昭和 63 年 3 月 31 日現在

CDS* No.	材 料 名	出版状況	CDS* No.	材 料 名	出版状況
1A	STBA22	初, A	21A	SCMV3NT	初, A
2A	STBA23	初, A	22A	A286	初, A
3B	STBA24	初, A, B	23A	S590	初, A
4B	304 H TB	初, A, B	24A	AISI687	初, A
5B	321 H TB	初, A, B	25A	SPV50	初, A
6A	316 H TB	初, A	26A	NCF800 HTB	初, A
7A	STBA2	初, A	27A	NCF800 HP	初, A
8A	STBA12	初, A	28A	347 HTB	初, A
9A	A470-8	初, A	29A	713C	初, A
10A	SUH616-B	初, A	30A	X45	初, A
11A	SCMV4NT	初, A	31A	A356-9	初, A
12A	STBA25	初, A	32	304-HP(W)	初, A
13A	403-B	初, A	33	N155 (C, F)	初, A
14B	316-HP	初, A, B	34	U500 (C, F)	初, A
15A	316-B	初, A	35	SCMV2NT	初, A
16A	HK-40	初, A	36	A542	初, A
17A	SB49	初, A	37	HH-II	初, A
18B	SBV2	初, A, B	38	HP	初, A
19A	STBA26	初, A	39	NCF750	初, A
20A	STBA20	初, A	40	STB52	初, A
			41	NCF600 (B, P, TB)	初, A

* : クリープデータシート

初: 初版(1-2×10⁴h), A: A版(3-5×10⁴h), B: B版(10⁵h)

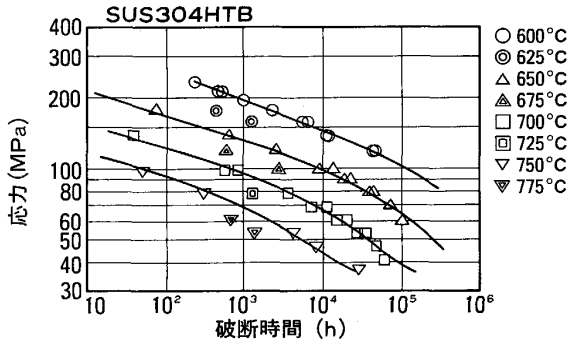


図 1 SUS304HTB の 10 万 h クリープ破断試験

h に達した鋼種については、初版のデータシートとして、5 万 h までのデータについては A 版、10 万 h までのデータについては B 版として出版している。B 版が初めて出されたのは昭和 61 年度で、現在まですでに 5 鋼種について 5 冊のデータシートが刊行されているが、更に今後次々と出版される予定である。既に得られたデータを見ると、10 万 h における破断応力は、数千時間までの値を外挿して予測した値よりもかなり低下する傾向が認められた (図 1 参照)。従って、機器・構造物の設計や安全性を確保するうえで、このようなデータの蓄積は不可欠と考えられる。この種の研究を国立研究機関で行うことに批判もあるが、寿命・余寿命の研究を行うためにも必要なデータであり、本プロジェクトの完遂を目指している。

2.2 疲労データシート

クリープと並行して、機械構造用材料の疲労特性、溶接継手の疲労特性及び高温疲労特性の 3 項目にわけて疲労データの採取を行っている (表 2 参照)。現在までに 35 鋼種について 58 冊の疲労データシート及び 4 冊の疲労データ資料を出版した。

表 2 金材技研疲労データシート出版状況

昭和 62 年 12 月現在

サブテーマ	内 容	デ ータ シ ー ト	
機械構造 用材料の 疲労特性	高サイクル 疲労	炭 素 鋼	S25C, S35C, S45C, S55C
		低 合 金 鋼	SMn438, SMn443, SCr440, SCM435, SCM440, SNC631, SNCM439, SNCM447
		ステンレス鋼	SUS403, SUS430, SUS304
	低サイクル 疲労	炭 素 鋼	S25C, S35C, S45C,
		低 合 金 鋼	SCr440, SCM435, SNCM439
		肌 焼 鋼	SCr420, SCM420, SNCM220, SNCM420
溶接継手 の 疲労特性	試験片寸法の効果 (試験法標準化)		SM50B (突合せ, リブ十字, 十字) SM58Q (突合せ), HT80 (突合せ)
	施工法 の 効果	余盛付軸荷重 き 裂 伝 ば	SM50B (突合せ, リブ十字), HT80 (突合せ) SM50B (突合せ), HT80 (突合せ)
	応力比 の 効果	削出し丸棒 余盛付軸荷重 き 裂 伝 ば	SB42, SPV50 SB42, SPV50, SUS304 SB42, SPV50, SUS304
	高サイクル疲労		S45C, SCM435, A470-8, SCMV4, SUS403, SUH616, SUS304, SUS316, NCF800H
	低サイクル疲労		SB49, SCMV3, SCMV4, SUS316
	時間依存低サイクル疲労		A470-8, SUS304, NCF800H

金材技研疲労データシート 58冊

金材技研疲労データシート資料 4冊

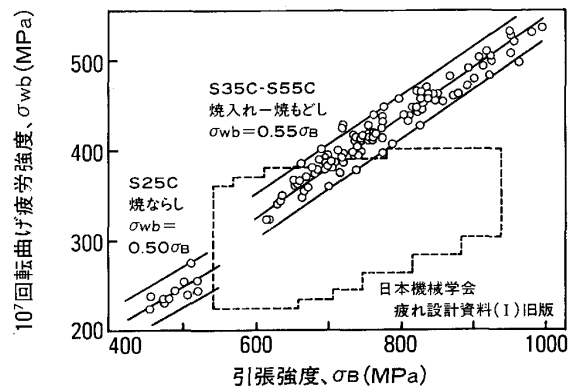


図 2 各種炭素鋼の引張強度と疲労強度の相関関係

図 2 は S25C, S35C, S45C, 及び S55C の回転曲げ疲労試験データの例を示す。10⁷ サイクル疲労強度と引張強度の間には明瞭な直線関係が認められる。一方、従来のデータは、図 2 中の破線部分に分布しており、上記のような関係は認められない。これは、試験にあつての種々の条件が異なることに起因していると考えられ、本研究のように同一の条件で系統的に試験を行うことの重要性が明らかである。

今後は、上記のクリープ及び疲労データシート計画を進めるとともに、これらのデータベース化を図る予定である。また、材料の損傷や劣化の機構を解明し、材料の寿命・余寿命を精度良く評価する手法を確立することが機器・構造物の安全性を確保するうえで極めて重要であ

表 3 金属間化合物材料

用途	金属間化合物の実例	利用する性質
構造材料	耐熱材料 Ni_3Al , TiAl , MoSi_2	・強度の逆温度依存性
	耐食材料 MoSi_2 , NiAl	・化学的安定性
	耐照射材料 Zr_3Al , MoSi_2 , WSi_2	・原子の拡散が遅い
	高硬度材料 TiC , BN, WC	・高強度
機能材料	形状記憶材料 TiNi , CuAlZn , Fe_3Pt	・熱弾性型マルテンサイト変態
	超電導材料 Nb_3Ge , V_3Ga , $\text{V}_2(\text{Hf}, \text{Nb})$	・超電導特性(電子対の形成)
	磁性材料 $\text{Fe}_3(\text{Al}, \text{Si})$, FeCo , MnAl	・磁気特性(高透磁率、大残留磁化、大保磁力)
	水素吸蔵材料 FeTi , CaNi_5 , Mg_2Ni	・水素化合物の形成(水素吸蔵・放出能力)
	半導体材料 FeSi_2 , PbS , InSb	・半導性(正又は負の電荷を持つキャリアーによる電気導性、光電効果、整流性)

(□) は当研究所で取り上げたもの

り、今後の大きな課題と考えられる。

3. 新材料開発

金属材料技術研究所における新材料開発に関する研究は、以下の三つの分野を重点として推進している。すなわち、(1)レアメタル、(2)金属間化合物、(3)人工・特殊構造物質の3分野である。

3.1 レアメタル

地球上ではこれまでに 100 種類以上の元素の存在が知られ、そのうち 80% 以上が金属であるが、それらの性質等は、かならずしも十分に知られていないのが現状である。中でもレアアースを中心とするレアメタルは電氣的・磁氣的性質などに特徴のある元素が多いことで知られているが、分離や高純度化が困難なため、その固有の性質はあまり厳密に理解されていない。また、Fe や Cu 等の元素についても高純度化したものについてはレアメタルと見ることができ、従来の性質にはない新しい機能が見出せる可能性もある。

3.2 金属間化合物

表3にこれまでよく知られている金属間化合物材料の性質とその応用例を示す。□印は金属材料技術研究所で取り上げた化合物であり、耐熱構造材料あるいは超電導材料、半導体材料をはじめ、磁性材料、水素吸蔵材料、形状記憶材料などの機能性材料まで広い範囲を研究対象としている。このような化合物の合成法としては、粉末冶金法や薄膜蒸着法などを含め、多彩な技術が用いられている。さらに化合物の塑性変形能を引き出すため側圧付加押出法を用いたり、添加元素により延性を改善する方法などを提案している。

金属材料技術研究所では、金属系超電導材料の研究を開始してすでに二十数年が経過し、その間、超電導材料の開発や線材化技術などで多くの成果を上げてきた。表4はこれまで研究を行ってきた金属系超電導材料の一覧

表 4 金属系超電導材料

開発フェーズ	材料	臨界温度 $T_c(\text{K})$	製造法	主な用途
I 実用線材	ニオブ・チタン (Nb-Ti)	9	溶解・線引	核融合実験装置(原研他) 磁気浮上列車(JR) 核磁気共鳴診断装置
	バナジウム3ガリウム (V_3Ga) ニオブ3スズ (Nb_3Sn)	15 18	In situ 法 ブロンズ法	実験用マグネット(金材技研他) ミラー型核融合実験装置(米国、ローレンスリバモア研究所)
III 実用化研究中	ニオブ3アルミニウム (Nb_3Al)	19	融体急冷法	
	ニオブ3アルミニウムゲルマニウム ($\text{Nb}_3(\text{Al}, \text{Ge})$)	21	融体急冷法	
	ニオブ3ゲルマニウム (Nb_3Ge)	23	蒸着法	

であるが、ニオブ・チタン合金を除くとすべて金属間化合物である。実用線材として用いられている材料としては、 V_3Ga 及び Nb_3Sn があり、それぞれ実験用強磁界マグネットやミラー型核融合実験装置などの種々の用途に使われている。また現在、実用化にむけて研究中のものとしては臨界温度 (T_c) が高い Nb_3Al , $\text{Nb}_3(\text{Al}, \text{Ge})$ 及び Nb_3Ge がある。これらの材料の製造法についても材料別に最適な方法を開発しながら研究を進めている。図3はその一例として、線材化技術の一つである複合加工法(ブロンズ法)による線材製造の流れを示したものである。まず銅-すず合金(ブロンズ)に穴加工を施し、その中に金属ニオブを挿入する。その複合体に対して押出加工や引抜加工を行い、その引抜材を銅パイプに再組込みを行う。それをさらに線引き加工して所定の太さの線材とした後、母相合金中のすず原子をニオブ中に拡散させるための熱処理を行い Nb_3Sn の超電導体を得る。この方法により製造した、Ti を添加した Nb_3Sn の極細多芯線を用いて 18.1 テスラの超電導マグネットが開発されている。現在さらに強力なマグネットの建設を計画中である。

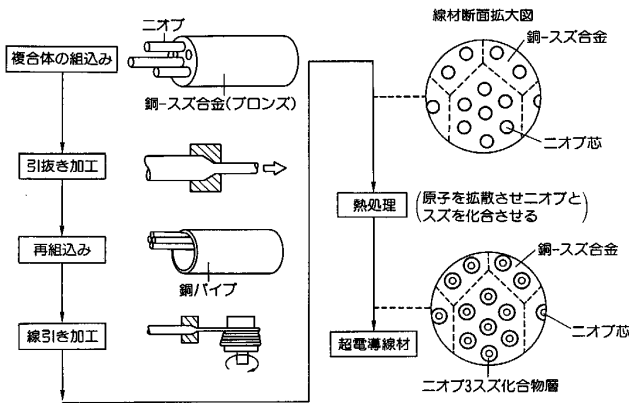


図 3 複合加工法 (ブロンズ法) による Nb₃Sn 線材製造工程

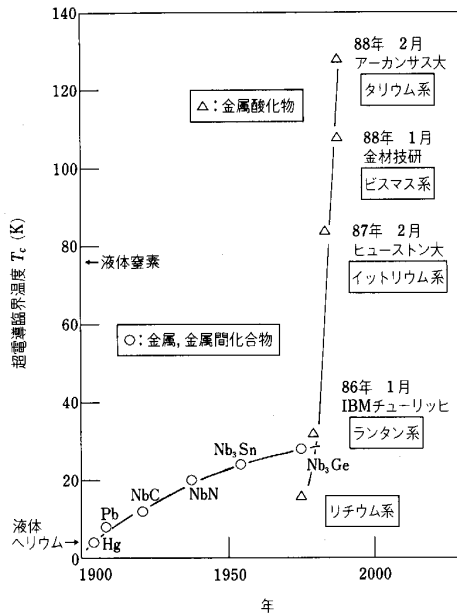


図 4 超電導臨界温度 T_c の歴史的変遷

図 4 は、超電導材料の臨界温度の歴史的変遷をまとめたものである。○印で示した金属や金属間化合物材料については、水銀の超電導現象の発見以来、 T_c の上昇速度は非常に緩やかであり、現在でも 20 K 台に留まっている。これに対して、△印で示された金属酸化物系超電導材料は、1986 年末、ランタン系物質が IBM チューリッヒ研究所で発見され、ついで、イットリウム系物質がヒューストン大学で発見されて以来、 T_c の上昇は極めて急速である。特にイットリウム系物質の発見は、 T_c が液体窒素温度 (77 K) 以上であるという点で実用上の観点からも非常に関心が高く話題を呼んだ。その後 1988 年 1 月には T_c が 100 K を超えるビスマス系物質が金属材料技術研究所で発見された。このビスマス系物質はレアアースを含まないという点で経済的にも有利であると考えられる。さらに 4 番目の新物質として、米国

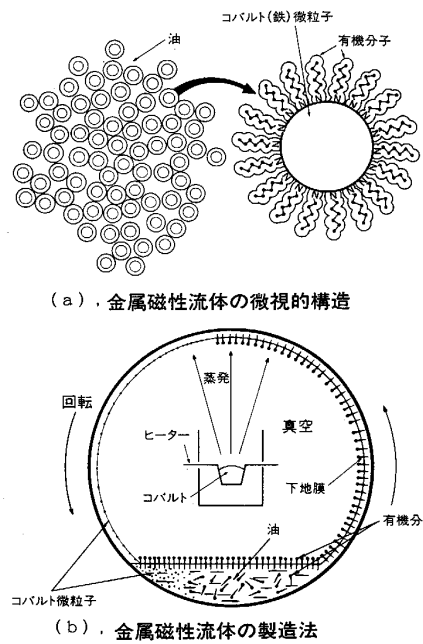


図 5 金属磁性流体の微細構造 (a) と製造法 (b)

で 120 K を超えるタリウム系物質が発見された。タリウムには毒性があり取扱いには注意を要するものであるが、高い T_c を持つ物質が次々と見つかることは、理論的研究の立場からも、また常温超電導物質発見の可能性を示唆する点からも極めて有意義である。

鉄けい化物を用いた熱発電素子も金属間化合物の利用例の一つである。FeSi₂ に Mn 及び Co をそれぞれ添加したものをを用いて PN 接合を作り、その接合部を加熱することにより電力を取り出すことができる。

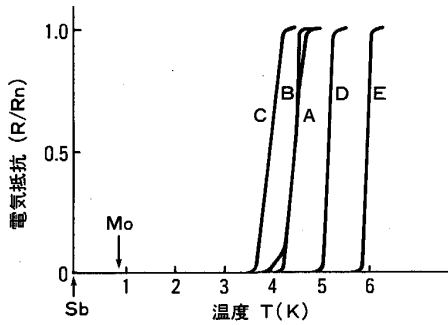
以上いくつかの例に見られるように、金属の化合物には未知の機能がまだまだ埋もれており、新材料開発の宝の山であるといえる。

3.3 人工・特殊構造物質

超薄膜や超微粒子などの人工・特殊構造物質は、その構造に由来する特異な現象を起こし、高温超電導材料、オプトエレクトロニクス材料、磁性材料、高速動作素子等への応用が期待されている。近年のマイクロ構造制御技術、超高真空技術、反応制御技術、測定・解析技術等の発達により初めて可能になった分野であり、今後の材料開発の中核の一つとなるものと考えられる。

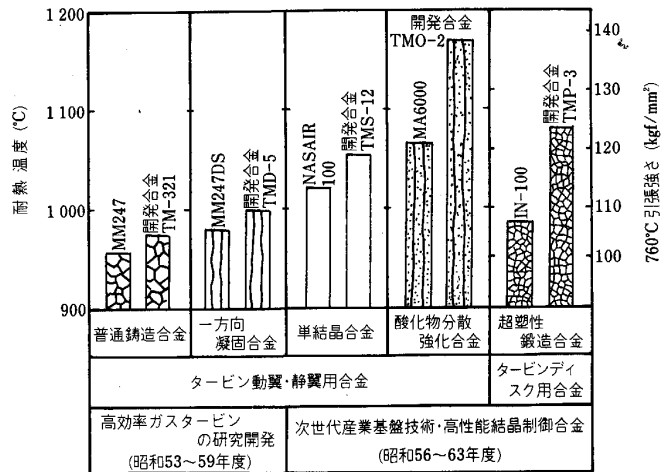
図 5 (a) に、Co, Fe, Ni などの磁性金属微粒子 (直径約 50 オングストローム) を有機分子で包んで溶媒中に分散させた金属磁性流体の微細構造を模型的に示す。真空中でこれらの金属を蒸発させ、界面活性剤を含んだ油の表面に蒸着させるという新しい手法 (図 5 (b) 参照) の開発により、従来のものより格段に優れた性能を持つ磁性流体の創製が期待されている。

図 6 は、分子線エピタキシー (MBE) により作製した、Mo 原子と Sb 原子の積層膜の超電導転移温度と積層周



A, B, C, D, E の積層周期はそれぞれ 90, 69, 59, 40, 20Å である。
0.9K, 0K は Mo と Sb の超電導転移温度

図 6 Mo/Sb 積層膜の超電導転移温度と積層周期の関係



耐熱温度：14 kgf/mm² 応力下のクリープに 1000 h 耐える温度

図 8 高温特性の優れた開発 Ni 基耐熱合金

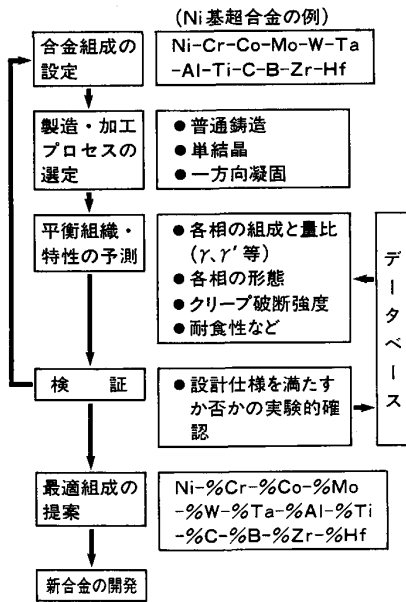


図 7 合金設計の流れ図 (Ni 基合金の例)

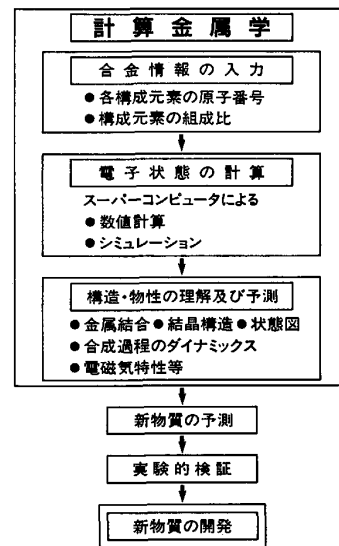


図 9 計算金属学の流れ図

期の関係を示す。積層膜の超電導転移温度は Mo 及び Sb 単体に比べ著しく上昇しており、また積層周期が小さくなるほど上昇する傾向が見られる。また、これと同種の技術による PbS と PbCdSSe の極薄膜多層構造は、中赤外域 (波長 3.5 ミクロン) の光を発する半導体レーザーとして、光による太平洋無中継横断通信システムなどへの適用が可能な新素材として注目されている。

4. 材料設計

経験や勘に頼らず効率的に有用な材料の創製を行おうとする「材料設計」に関する研究が活発化している。これらの研究の発展は、近年のコンピューター及びその利用技術の発達によるところが大きい。

材料の構造と特性に関する理論や経験的知見に基づく

材料設計技術の適用例に Ni 基超合金の開発研究がある。図 7 に合金設計のフローを示す。①まず、可能な合金元素をすべて含む系について合金組成を設定し、②製造プロセスを選定し、③γ相、γ'相等の組成と量比などの平衡組織を計算する。また、回帰式等を用いて種々の特性値を計算した後、いくつかの候補合金を選定し、④これらについて設計仕様を満たすか否かの実験的検証を行う。このプロセスを繰り返すことにより、最終的な新合金が開発される。この材料設計法により、図 8 に示すような高温特性の優れた Ni 基耐熱合金が開発されている。いずれの製造プロセスにおいても、開発合金の特性は世界レベルを大きく上回るものである。

一方、近年、上記の手法で用いられるような経験的な

