

高速増殖炉における材料研究

Research and Development Work on Material of Heat Transport System Components for Fast Breeder Reactor

高速増殖炉の冷却系設備に使用される材料は、ナトリウム環境下でかつクリープ温度領域で運転され、従来の原子力機器用構造設計基準の適用上限温度を超える。我が国では動力炉・核燃料開発事業団を中心に、高速増殖炉用高温構造設計基準作成を目的とした研究開発を展開してきており、日立製作所は主として冷却系機器を中心にこれに参画し、この高温設計基準作成のための基本的材料データの取得、及び信頼性向上のための材料開発並びに評価技術の検討を中心とした系統的な材料研究を実施している。

本報告は、高速増殖炉原型炉「もんじゅ」冷却系設備用材料を対象とした研究状況の概要、及び今後の高速増殖炉設備用材料に関する研究について述べる。

祐川正之* Masayuki Sukekawa
 中川幸雄** Yukio Nakagawa
 下屋敷重広*** Shigehiro Shimoyashiki
 福田嘉男**** Yoshio Fukuda
 木村征二***** Seiji Kimura

1 緒言

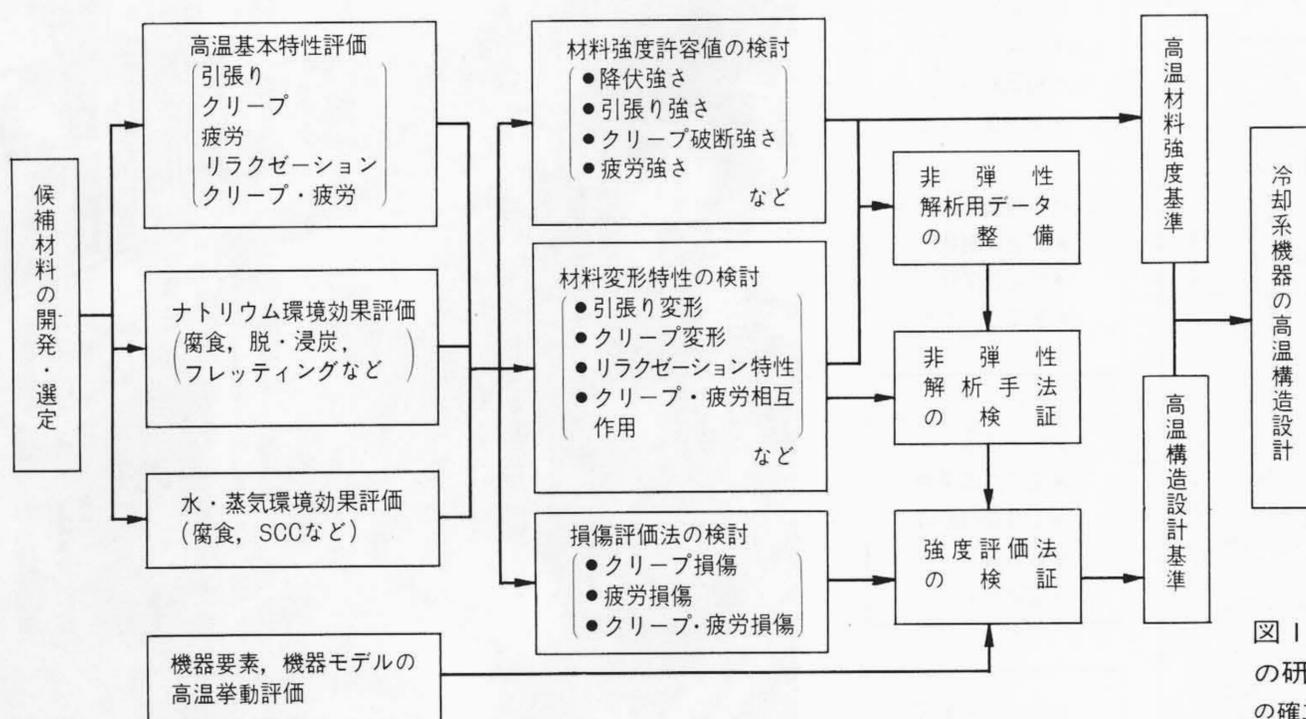
高速増殖炉での高温構造設計は、原子力機器としての安全性の要求から、設計寿命を通じての構造健全性評価が必要となり、従来の高温機器での応力基準の設計から、機器の応力及びひずみを評価する応力・ひずみ基準の設計への転換が行なわれている。これら設計に対処するためには、使用される材料の高温での挙動・特性を正しく知ること、及び材料や構造の挙動を把握するための非弾性解析技術の確立が必要となる。このためには、使用される材料の高温での挙動及び特性を実験的に正確に把握することが重要となる。日立グループは主として冷却系設備を対象として、この研究開発に参画してきた。

本報告では、動力炉・核燃料開発事業団を中心に開発中の高速増殖炉原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す。)冷却系機器用材料の研究開発、及び今後の高速増殖炉用材料の研究開発について紹介する。

2 高速増殖炉冷却系設備用材料研究

2.1 研究対象材料

高速増殖炉冷却系設備用材料としては、中間熱交換器、配管、循環ポンプなどを中心とした一次冷却系設備用材料、及び蒸気発生器、配管などを中心とした二次冷却系設備用材料に区分される。これら冷却系設備に使用される主要材料としては、オーステナイト系ステンレス鋼及びフェライト系合金鋼が挙げられる。「もんじゅ」冷却系機器用主要材料であるオーステナイト系ステンレス鋼、及び $2\frac{1}{4}$ -Cr-1Mo鋼の母材・溶接部の材料試験については、動力炉・核燃料開発事業団を中心とし国内主要機器メーカーの参画のもと各社分担による共同研究により実施している。その成果は高温材料強度基準として取りまとめられている。日立製作所は、主として一次冷却系設備用オーステナイト系ステンレス鋼SUS304、及び蒸気発生器過熱器用オーステナイト系ステンレス鋼SUS321に関する材料研究を実施している。



注：略語説明 SCC(Stress Corrosion Cracking)

図1 高速増殖炉冷却系設備用材料の研究開発フロー 高温構造設計基準の確立及び新材料開発のため、多岐にわたる材料研究が進められている。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所エネルギー研究所 **** 日立製作所機械研究所 工学博士
 ***** パブコック日立株式会社呉研究所

また、高速増殖実証炉の冷却系設備用候補材料についても、低合金鋼から高合金鋼にわたり広範囲な材料について研究を実施している。

2.2 研究内容

高速増殖炉の高温構造設計には、膨大な材料基本データが必要になるほかに、高速増殖炉特有の高温ナトリウム効果や二次冷却系設備では水・蒸気環境効果データの蓄積が必要である。図1に高温構造設計指針確立のための、材料研究の立場からの研究開発フローチャートを示す。

高速増殖炉冷却系設備に使用される材料の研究は、高温構造設計基準確立のための材料基本データの採取・蓄積、及びこれを基に使用材料として適切な仕様を定めることが目的である。次に、このようにして得られた材料、及びこの材料を用いた機器要素による各種材料挙動・強度試験データの採取・蓄積を行ない信頼性・安全性を検証することが必要となる。この目的を達成するためには、材料の特性に影響を及ぼす種々の因子をパラメータとした実験的検討が必要となる。図2は上記観点からの材料研究での検討内容を示す。高速増殖炉冷却系設備に使用される材料は、管、板、鍛造などと、製法及び形状・寸法が多岐にわたっている。したがって、材料研究としてはこれら材料及びこれら材料を用いた溶接部の基本特性を影響因子と関連づけて把握することが重要となる。図3～5に、材料特性を把握するための材料試験設備の一例を示す。

3 「もんじゅ」一次冷却系材料

「もんじゅ」一次冷却系設備用材料研究としては、主要材料であるSUS304オーステナイト系ステンレス鋼を中心に母材・溶接部を対象として、大気中での各種特性試験及びナトリウム環境試験を実施している。ナトリウム環境試験の結果は、トライボロジ評価、質量移行評価及び腐食損傷評価などに活用している。また、これら大気中及び環境下での試験を中心

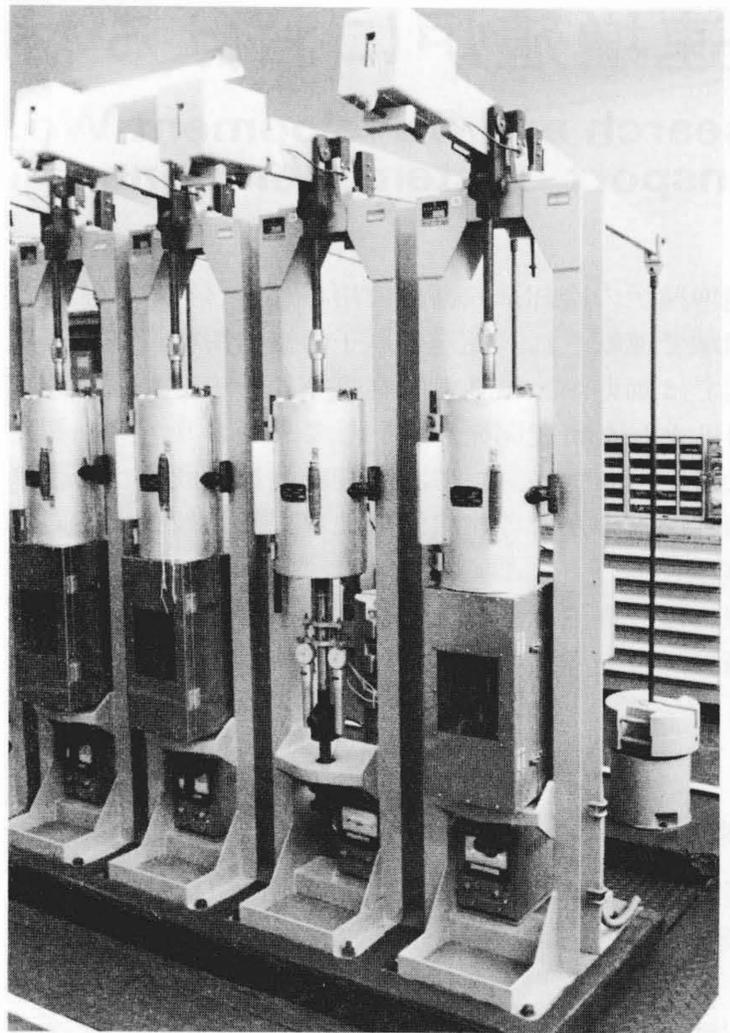


図3 自動クリープ試験装置 温度調節器、自重データ集録器などを備えたクリープ試験装置(動力炉・核燃料開発事業団からの貸与品)により、精度の高いクリープ特性試験が実施されている。

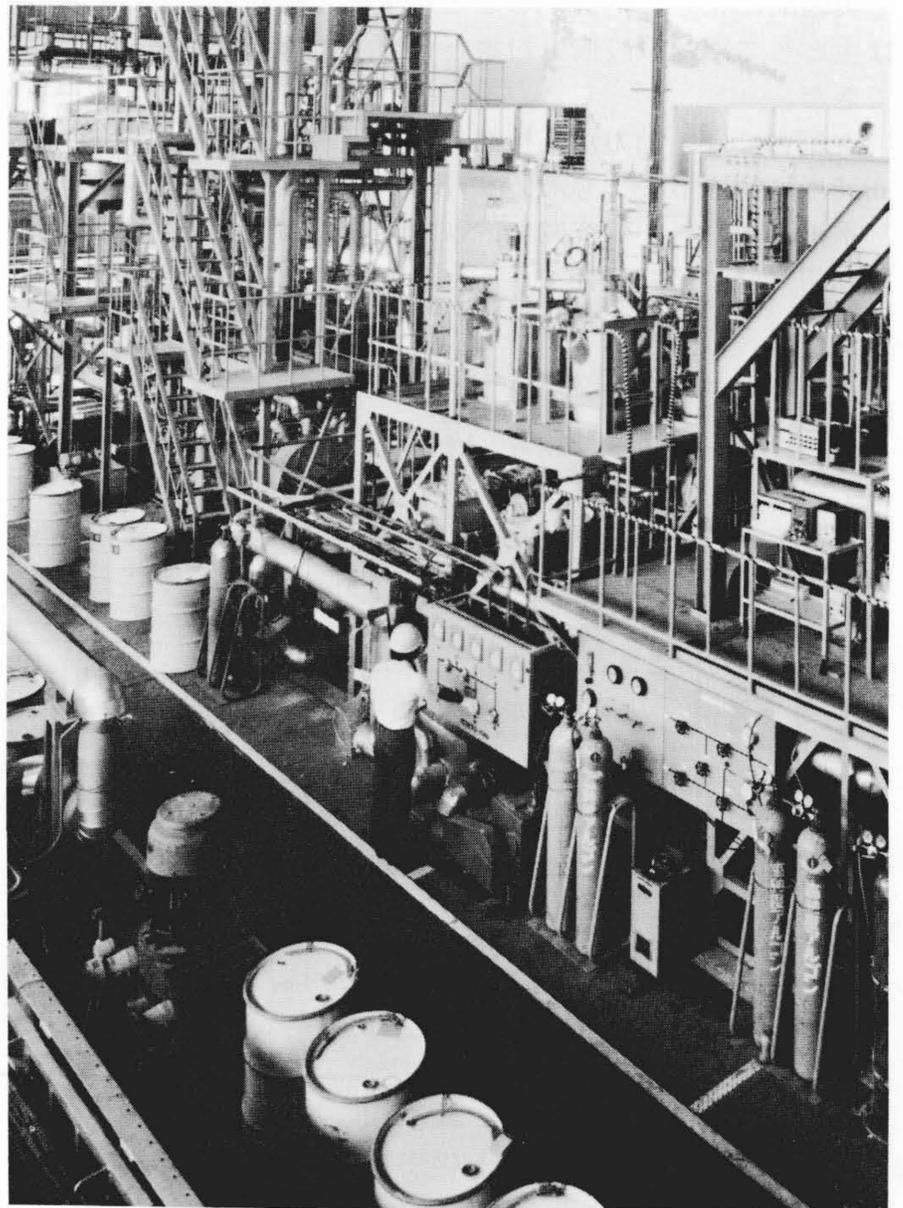


図4 液体ナトリウム実験装置 高速増殖炉は液体金属ナトリウムを冷却媒体にしているため、液体金属ナトリウム環境下での材料挙動の把握も大切なことである。

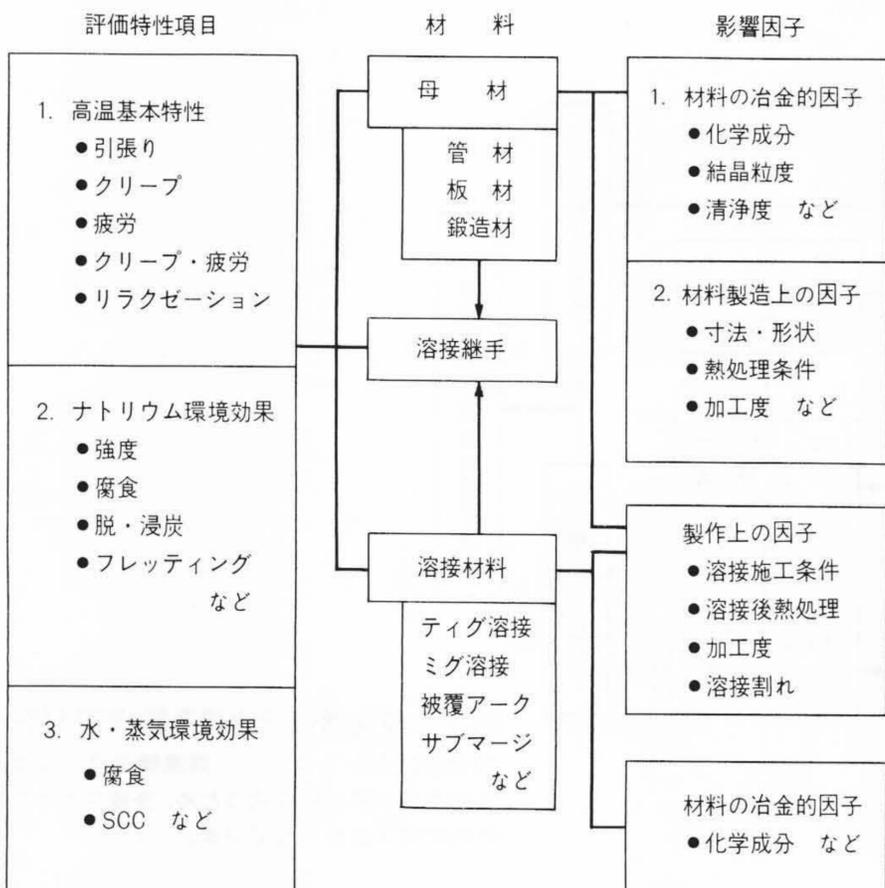


図2 高速増殖炉用材料研究の課題 材料研究は、評価特性項目、影響因子、材料が複雑に組み合わせられた多岐にわたる研究課題を効果的に推進することが重要となる。

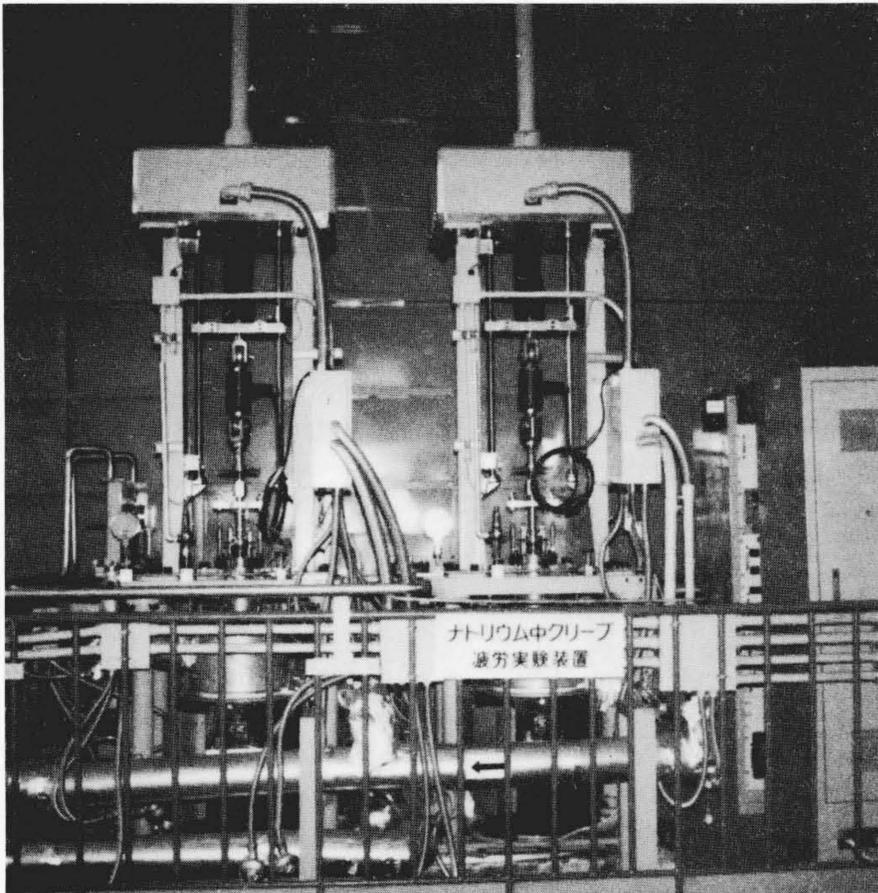


図5 ナトリウム中クリープ・疲労試験装置 ナトリウム環境効果試験の一環としてナトリウム環境下でのクリープ、疲労挙動を把握する。

とした材料研究の成果を基に作成された基準は、各種要素試験により^{1)~3)}、更にその妥当性が裏づけられている。

4 「もんじゅ」蒸気発生器用材料

「もんじゅ」蒸気発生器に使用される材料としては、過熱器にはオーステナイト系ステンレス鋼が、蒸発器には $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼が検討されてきた。本章では、過熱器材料としてのオーステナイト系ステンレス鋼の研究開発について述べる。

4.1 研究内容

蒸気発生器に使用される材料に対しては、高温強度とともにナトリウム環境、及び水・蒸気環境下での特性が優れていることが要求される。過熱器用材料としては、高温強度及び環境効果の観点からチタン入りのSUS321オーステナイト系ステンレス鋼を取り上げ、主として高温強度と各種影響因子の関係について検討している。

まず、高温強度へ影響を与える冶金的因子として、(1) 清浄度、(2) 結晶粒度、(3) 炭素、チタンのマトリックス固溶状態、(4) チタン及びクロム炭化物の析出状態、が考えられる。

これら因子を作用する条件として、(1) 製造方法、(2) 熱処理温度、(3) 冷却速度、(4) 化学成分(主として炭素、チタン)を取り上げ、実験室溶解による試験片を用いて基礎的研究を実施し、これを基に大型材を製作し強度検証を実施している。

4.2 基礎研究結果

SUS321鋼の高温強度に及ぼす溶体化処理温度、冷却速度及びチタンと炭素量の影響について検討した結果を要約すると次のようになる。

SUS321鋼の高温強度は、炭素の固溶量の増大とともに上昇する。炭素の固溶量は溶体化処理温度、冷却速度及びチタンと炭素の含有量に影響される。

図6に550℃引張強度とチタン添加(炭素：一定)の関係を、図7に炭素、チタンの固溶量及びチタン炭化物析出量とチタン添加量(炭素一定)との関係の一例を示す。この二つの図からSUS321鋼の高温強度に関して次の特徴的なことが分かる。(1)

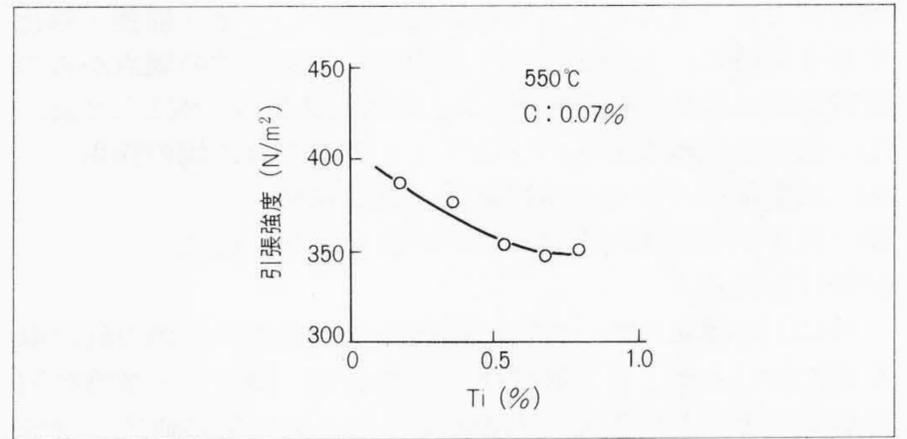
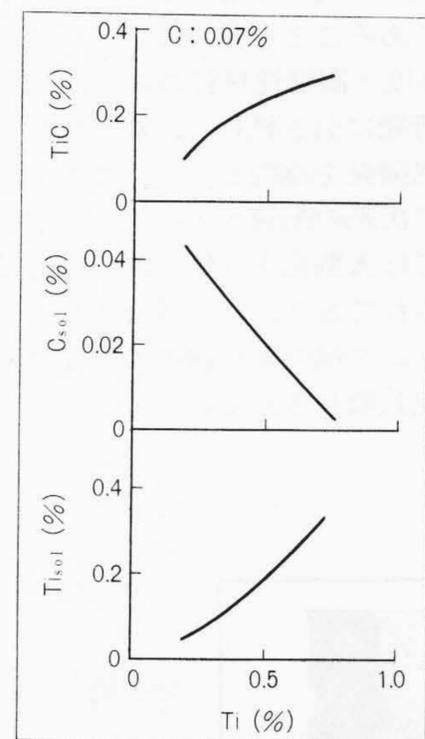


図6 SUS321鋼の引張強度に及ぼすTiの影響 SUS321鋼、特に肉厚材の場合、高温強度は、TiやCの成分量、溶体化処理温度、冷却速度などに影響され、最適な条件決定が材料研究の重要課題となる。



注：Tisol(マトリックス固溶チタン)、Csol(マトリックス固溶炭素)、TiC(チタン炭化物)

図7 SUS321鋼厚肉鍛造材でのC、Tiの存在状況とTi含有量の関係 SUS321はTiを含んでいる材料であり、Ti量の増加に伴って、材料内部マトリックスに固溶されているC、Ti及びTiC析出量に変化する。この固溶C、Tiの量が強度に大きく影響してくる。したがって、適切な固溶C、Tiにするための技術開発も材料研究の重要課題である。

炭素が炭化物として析出した状態よりも、マトリックスに固溶した状態で高い高温強度をもっている。(2) チタンの増加に伴い、析出炭化物、固溶チタン量は増大するが、固溶炭素量がチタン含有量の増加とともに顕著に低下する。このような現象は厚肉になるとその効果が顕著に現われてくる。すなわち、厚肉になると冷却速度が低下し、冷却過程での炭化物析出反応により固溶炭素を更に減らす作用が現われる。

以上のような基礎的な検討結果を基にして、冷却速度の異なる薄肉管材や厚肉鍛造材それぞれに対し、溶体化処理温度、炭素量及び炭素量とバランスを取ったチタン量について最適条件を定めている。これら研究結果は、機器設計及び高温材料強度基準へ反映されている。

5 高速増殖実証炉設備用材料

高速増殖実証炉では出力が電気出力1,000MWクラスが考えられており、設備も更に大型化してくる。したがって、材

料研究でも「もんじゅ」での研究成果をいっそう補強・強化すると同時に、大型化に伴う諸問題及び経済性の観点からの研究開発に取り組む必要がある。具体的課題の一例としては、

- (1) 蒸気発生器などへのフェライト系高クロム鋼の採用
- (2) 大型部材及びその溶接継手の高温強度
- (3) 原子炉容器用大型異材継手の製作性及び特性が挙げられる。

特に(1)の課題については、国内外各研究機関で精力的に取り組んでいるが、日立製作所も電力会社、動力炉・核燃料開発事業団との共同研究への参画あるいは社内的に研究を継続している。本研究の基本的考え方は、(a)一体貫流型蒸気発生器を対象とし、その使用材料の開発・選定、(b)広い範囲での運転温度条件に対処した材料の開発・選定、である。

このような考えの基に、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}\sim 12\text{Cr}$ 系のフェライト系鋼、オーステナイト系ステンレス鋼及び高合金鋼を対象として基本特性に及ぼす冶金的因子の影響について検討している。その結果、蒸気発生器用材料としては9Cr系鋼が現時点での候補材として有望であることを見いだしている。また、高合金鋼についても高強度・高延性材料の開発に成功している^{4),5)}。

今後は、基礎研究に引き続いて、蒸気発生器への適用化のための実用化研究開発を継続していくつもりである。なお、これらの材料は二次系の配管への採用も検討されている。

また、実証炉では大型化する炉容器の低温部に炭素鋼を用いる設計も考えられており、この場合生じる炭素鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の異材継手の製作性及び特性にかかわる研究にも、鋭意取り組んでいる。

6 結 言

我が国で初めて本格的な高温構造設計が適用される「もんじゅ」冷却系設備用材料、及び将来の実証炉冷却系設備材料にかかわる研究開発状況の一部について紹介した。

「もんじゅ」用材料の研究開発の推進に当たっては、動力炉・核燃料開発事業団の関係各位及び日本溶接協会での共同研究で、諸先生方の直接御指導をいただいた。また、実証炉材料研究開発に当たっては、電気事業連合会高速増殖炉開発準備室を中心とする電力会社、財団法人電力中央研究所及び動力炉・核燃料開発事業団の各位から終始、御指導をいただいた。併せてここに深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) K. Iida, et al.: Low-Cycle Fatigue Behaviours of 304 Stainless Steel Piping Elbows at Elevated Temperature, Trans. 5th SMiRT (1979)
- 2) K. Iida, et al.: Creep and Relaxation Behaviours of 304 Stainless Steel Piping Elbows, Trans, 5th SMiRT (1979)
- 3) F. Hataya, et al.: Development of a New Tube-to-Tubesheet Welding Type for FBR's Heat Exchangers, Proc. 3rd International Conference on Welding in Nuclear Engineering (June 1978)
- 4) 桐原, 外: インコロイ800系材料の基礎検討(その1), 鉄と鋼, Vol. 68, No. 12(1982-9)
- 5) 土井, 外: インコロイ800系材料の基礎検討(その2), 鉄と鋼, Vol. 69, No. 12(1983-9)

論文抄録

多層パーマロイ膜の磁気特性

日立製作所 光岡勝也・成重真治・他3名
電子通信学会論文誌 J68—C, 6, 468~474 (昭60-6)

磁気ディスク装置の大容量化に伴い、従来のフェライトブロックを切断加工した磁気ヘッドから高周波領域での透磁率が大きいパーマロイ膜(厚さ $2\mu\text{m}$ 程度)を磁気コアに用いた薄膜磁気ヘッドに移行しつつある。最近、パーマロイ膜だけの単層膜に比べて、パーマロイ膜の間に無機絶縁膜を介した多層構造のパーマロイ膜は数十メガヘルツの高周波領域での透磁率が極めて大きいことが報告されたが、パーマロイ膜の磁気ひずみ定数については明確でなく、磁気特性に影響する応力誘起異方性についてはこれまでのところ不明であった。筆者らは応力誘起異方性の効果が無視できるように磁気ひずみ定数が 10^{-7} オーダの大きさのパーマロイ膜をスパッタリング法で作製し、単層及びパーマロイ膜の間にアルミナ膜を介した5層及び10層構造のパーマロイ膜(シート状及びストライプ形状)の高周波領域での透磁率、保磁力及び磁区構造を調べ、多層化による効果を検討した。

まず、シート状パーマロイ膜の磁気特性を検討した。パーマロイ膜は磁界中スパッタリング法で形成して一軸異方性を付与した。NiとFeの組成比を選定することにより、磁気ひずみ定数の小さいパーマロイ膜を得た。測定磁界を作製した膜の困難軸方向から傾けて印加したときの透磁率の励磁方向依存性の測定により、単層及び多層パーマロイ膜の磁化過程は、回転磁化過程によるものと考えられる。また、単層、5層、10層と層数が多くなるにつれて、中間層のアルミナ膜が薄くなるに従い容易軸方向及び困難軸方向のいずれの保磁力も小さくなった。

次に、ストライプ形状にパターンニングした単層及び多層パーマロイ膜の透磁率の周波数特性を測定した結果、多層パーマロイ膜では高周波領域での透磁率が低下しないこと、 0.5MHz の透磁率は単層、5層、10層と層数が増えるにつれて大きな値となることが分かった。5層構造のパーマロイ膜をストライプ幅を変えて磁気特性を調べた結

果、ストライプ幅が狭くなるにつれて保磁力及び環流磁区の面積が大きくなり、高周波領域での透磁率は小さくなることが分かった。

以上のことから、多層パーマロイ膜をシート状からストライプ形状とすることにより中間アルミナ膜の表面積が小さくなり、層間容量は小さくなる。その結果、アルミナ膜を介して流れる渦電流はシート状の場合に比べて小さくなる。したがって、逆磁界が小さくなるため透磁率は低下しないで透磁率の周波数特性が改善されたものと考えた。更に、層数及び中間層の膜厚による高周波領域での透磁率の変化もアルミナ膜の容量の違いによる渦電流損失の差で説明できる。以上の結果から、ストライプ状多層パーマロイ膜の高周波領域での透磁率を大きくするには層数を多くし、厚い中間アルミナ膜を用いたほうが良いことが分かった。