

ODSフェライト鋼被覆管の製造コスト低減化 方策に関する検討(平成11年度作業)

(研究報告書)

2000年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

ODS フェライト鋼被覆管の製造コスト低減化方策

に関する検討 (平成11年度作業)

(研究報告書)

藤原 優行¹⁾、水田 俊治²⁾、鵜飼 重治²⁾

要旨

実用化戦略調査研究で実施している高速炉システム技術評価において、高温出口温度で 15 万 MWd/t 以上の燃焼度を達成するために不可欠な ODS フェライト鋼被覆管の実用化見通しを評価することになっている。そのため、これまでの ODS フェライト鋼被覆管の技術開発結果を踏まえ、将来の実用規模の観点から、長尺被覆管の量産を可能とする経済性の高い製造プロセスの成立性を検討し、量産コストの予備的評価を行った。将来の実用規模を想定した場合、全コストに占める素管製造コストの割合が大きく、そのコスト低減化のために考えられる方策についても予備調査を実施した。

1) 大洗工学センター、システム技術開発部、燃料材料技術開発グループ
客員研究員

2) 大洗工学センター、システム技術開発部、燃料材料技術開発グループ

Evaluation of Cost Reduction Method for Manufacturing ODS Ferritic Claddings

Masayuki Fujiwara, Shunji Mizuta, Shigeharu Ukai

Abstract

For evaluating the fast reactor system technology, it is important to evaluate the practical feasibility of ODS ferritic claddings, which is the most promising materials to attain the goal of high coolant temperature and more than 150 GWd/t. Based on the results of their technology development, mass production process with highly economically benefit as well as manufacturing cost estimation of ODS ferritic claddings were preliminarily conducted. From the view point of future utility scale, the cost for manufacturing mother tubes has a dominant factor in the total manufacturing cost. The method to reduce the cost of mother tube manufacturing was also preliminarily investigated.

1) Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Div. OEC, Visiting Researcher

2) Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Div. OEC

目 次

1. はじめに	1
2. これまでの開発経緯	1
3. 今年度の検討目的	2
4. 製造コスト低減化寄与因子の調査	3
4.1 製造コストの予備的評価	3
4.2 素管製造コスト低減化の検討	5
4.3 被覆管加工コスト	7
4.4 検査コスト	7
4.5 評価	8
5. 素管製造コスト低減のための予備調査	8
5.1 プレミックス粉末の適用性調査	8
5.2 中空素管の適用性調査	9
5.3 カプセルレス素管の適用性調査	9
5.4 評価	10
6. 海外素管の購入に関する調査	10
7. 今度の課題	12
8. まとめ	12

表及び図

表 1. ODS フェライト鋼被覆管開発の現状	14
表 2. ODS 鋼被覆管製造技術の開発課題	15
表 3. 現行の標準的製造工程における量産コスト評価	16
表 4. 素管製造プロセス	17
図 1. ODS 鋼被覆管製造コスト構成	18
図 2. ODS フェライト鋼素管製造法 (MA956 の例)	19

1. はじめに

高温出口温度で 15 万 MWd/t 以上の燃焼度を達成するための前提条件になっている ODS フェライト鋼被覆管の実用化技術開発については、現在までに、小規模のメカニカルアロイング処理、熱間押出棒材の孔あけ加工による素管製作、その後は PNC 316 鋼被覆管と同様の冷間圧延プロセスによって被覆管が製作可能となり、また試作した被覆管の内圧クリープ破断強度は目標値に近いレベルまで達している。

このような ODS フェライト鋼被覆管について、実用化戦略調査研究として実施している高速炉システム技術評価の中でその実用化見通しを評価することになっている。そのためには、長尺被覆管の量産を可能とする経済性の高い製造プロセス、製造技術の開発が必要となる。そこで今年度は、これまでの開発成果を基に、現状で考え得る量産コスト評価を行い、各製造工程について、今後の製造コスト低減化方策を検討した。

2. これまでの開発経緯

実用化段階の高速炉燃料の目標燃焼度は、取出平均燃焼度で 15 万 MWd/t 以上であり、この燃焼度に相当する高速中性子照射量は約 $50 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ に達する。このような高照射量でも照射変形抵抗性に優れることが期待されるフェライト鋼をベースに、高温プラントへの適用を目指して、高温クリープ強度改善のためイットリア酸化物粒子を微細分散した ODS フェライト鋼の開発を進めてきた。

ODS フェライト鋼被覆管の開発の現状を表 1 に示す。実用化を図る上での開発課題を以下の 4 項目に区分して、それぞれの開発の現状をまとめると以下の通りである。

(1) 被覆管製造技術

ODS フェライト鋼被覆管の製造法は、フェライト鋼粉末と Y_2O_3 粉末をアトライター内でメカニカルアロイング (MA) 処理した後、これらの粉末を熱間押出しにより固化成形し、これから冷間圧延により被覆管に製管するものである。固化成形までの上工程は従来の PNC316 等の被覆管製造にはないプロセスであるため、まずこれら一連の製造法を確立した。また、被覆管への製管に係わる下工程については、極めて硬い ODS フェライト鋼の加工・熱処理 (再結晶、変態) による軟化とピルガー圧延を適用して、PNC316 と同様の冷間圧延プロセスで被覆管を製造可能な技術を開発した。

(2) 被覆管の高温強度の改善

高温プラントの燃料設計から要求される燃料被覆管の700℃でのクリープ破断強度を参考にして、製造被覆管の当面の大気中クリープ強度目標値として700℃、10,000hrで120MPaを設定した。小規模ではあるが、製造した被覆管のクリープ破断強度はこの目標値に近いレベルまで改善されている。また、製造被覆管の700℃での周方向引張り強度も良好であり、使用温度範囲にわたって優れた延性を維持していることを確認している。

(3) 燃料要素技術開発

燃料ピン製造のために必要な端栓との加圧抵抗溶接技術（PRW）の開発は東海事業所で進められており、接合部は十分な引張り強度を有していることを確認している。

(4) 炉内使用環境での評価

海外の ODS フェライト鋼（MA957）は、 $40 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ においても体積増加 2%以内の優れた耐スエリング性を示している。JNC 開発材についてもイオン照射試験により、耐スエリング性が良いことを確認している。海外では、 α' の生成に起因する照射脆化を危惧しており、そのため JNC 開発材では α' の生成を抑制する観点から、Cr 濃度を 12%以下に規定している。

以上述べたように、これまでの ODS フェライト鋼被覆管開発において、加工・熱処理技術の開発という飛躍的な技術のブレークスルーを達成することにより、小規模ではあるが PNC316 被覆管と同様の冷間圧延による被覆管製造が可能であること、また製造した被覆管の内圧クリープ強度は、実用化段階の FBR 燃料被覆管に対して設計上要求される 700℃での開発目標値を達成できる見通しが得られている。また、PRW が ODS フェライト鋼被覆管と端栓との接合に適用できることを示した。

このように、これまでの開発は ODS フェライト鋼被覆管の燃料要素被覆管としての技術実現性を明らかにした段階と言える。

3. 今年度の検討の目的

本研究の目的は、高速炉システム技術評価において高温出口温度で 15 万 MWd/t 以上の燃焼度を達成するための前提条件になっている ODS フェライ

ト鋼被覆管の技術達成見通しを提示することである。そのため、これまでの ODS フェライト鋼被覆管の技術実現性の評価結果を踏まえ、将来の実用規模の観点から、長尺被覆管の量産を可能とする経済性の高い製造プロセス、製造技術の成立性・実現性を見通すことにある。

今年度は、現状で考え得る ODS フェライト鋼被覆管の量産コスト評価を行い、各製造工程に対して今後のコスト低減化方策を検討した。

4. 製造コスト低減化寄与因子の調査

4.1 製造コストの予備的評価

ODS フェライト鋼被覆管の目標性能達成ならびにコスト低減化のために、現状で考え得る製造技術開発課題を整理して表 2 に示す。

ODS フェライト鋼被覆管の基本組成は、これまでの研究により、フェライト系、マルテンサイト系についてほぼ目標性能を満たすものが求められている。

製造技術課題を各工程毎に示すと、まず出発原料である合金粉末が必要となる。これまでの R & D においては、Ar ガスアトマイズ法により予め合金組成に調合した粉末（プレアロイ粉末と言う）を用いてきた。これは合金組成のばらつきに対する信頼性が高いと考えたからであるが、ロットが小さい場合はかなり高価となる。量産化時にロットが大きくなればある程度のコスト低減は可能である。原料粉末のコスト低減策として、安価な元素粉末を用い、これらを秤量調合してメカニカルアロイング処理で合金化する方法がある（プレミックス粉末という）。99 年度より適用性検討を開始したが、コスト低減化の観点からは魅力が大きい。

メカニカルアロイング（以下、MA）処理は、強制攪拌型の高エネルギーボールミルであるアトライターを使用して開発を進め、アトライターによる MA 技術はほぼ確立された。大型アトライター導入による量産対応は可能と判断される。しかし、大量の鋼球をインペラーで強制高速攪拌するアトライターの構造から、大型化には限界があり、量産時には複数の大型アトライターを設置、運転する必要がある。アトライターを用いる方法より、設備費、運転費の低コスト化が可能と考えられる MA 技術として、大型化の容易な転動型あるいは振動型ボールミルを用いる方法がある。大型ボールミルによる MA 処理は、既に海外では商用化されている（例えば、INCO 社）。このような海外メーカを利用すれば、JNC 開発 ODS 鋼への大型ボールミルの適用可否を評価することができる。並行してコスト評価も行い、適用可であ

れば量産時に向けて導入を図る。

MA処理後粉末は、高温にて固化され、被覆管製造用素管に成形される。固化前には、MA粉末表面に吸着するガス成分除去のために、MA粉末を容器（カプセル）に入れ、高温加熱、真空脱気した後、密封する。密封カプセルを更に高温加熱して、圧縮し、固化する。圧縮固化体をさらに加工して素管形状に仕上げる方法と、圧縮固化時に素管形状に仕上げる方法がある。これまでの開発では、密封カプセルを熱間押出により丸棒形状に圧縮固化した後、機械加工により素管形状に仕上げている。この方法は、素管寸法精度が良好であり、小規模試作には対応できるが、穴あけ加工から長さの制限があること、機械加工費が高いこと、材料歩留が劣ることから、量産対応には不利と判断される。素管製造コスト低減の基本は、工数の短縮と単長をできるだけ長くすることである。この観点から、中空の粉末充填カプセルを用いた管押出法、CIP（冷間等方圧圧縮）あるいはHIP（熱間等方圧圧縮）により予め固化した素材からカプセルレスで管押出を行う方法が考えられる。粉末カプセルを実生産ラインの大型押出プレスで押出す場合には、粉末カプセル専用加熱炉の設置が必要となる。その他、商用化が進んでいる海外メーカーからの素管購入も検討する必要がある。

押出素管から寸法精度の厳しい細径薄肉の被覆管に加工する。ODSフェライト鋼は高強度材であり、従来材に比べると、延性、靱性、加工軟化性が低い難加工材であるため、これまでの開発では、被覆管加工技術に多大の努力が注がれてきた。冷間、温間引抜き加工法、PNC316鋼被覆管に適用されている3ロール圧延法が検討され、これらより2ロール圧延法（ピルガー一圧延）が最も適していることを見出している。しかし、ODS鋼は高強度材であるため、剛性の高いODSフェライト鋼専用2ロール圧延機への改良が望まれる。加工後の軟化焼鈍のため、フェライト系ODSフェライト鋼では従来より高温の光輝焼鈍炉が必要であり、またマルテンサイト系ODS鋼の場合は冷却速度を遅く制御できる真空あるいは不活性雰囲気炉が必要となる。粉末カプセル押出を採用する場合には、被覆管加工工程でのカプセル外管、内管の除去が必要で、内外面切削技術、設備が必要となる。内管を高耐食ライナーとして残す場合には、外管除去のみでよいが、ライナー厚み制御技術開発が必要となる。これら以外の加工技術、設備（洗浄、精整工程）は、PNC316鋼被覆管製造技術、設備の適用が可能と判断する。

被覆管形状に仕上げられた管は、被覆管技術仕様に従う検査が行われる。検査項目、方法は、「常陽」、「もんじゅ」被覆管に準拠して行なわれ、ODS鋼特有の課題は少ない。フェライト系ODS鋼被覆管の場合には、結晶粒が

加工方向に伸びるため、超音波探傷検査において軸方向探傷が困難となり、対策が必要となる。高耐食ライナーを採用する場合には、ライナー厚み測定技術が必要となる。検査項目はできるだけ合理化を図り、減らすことがコスト低減には必要である。ただし、ODS鋼被覆管特有の問題、強度異方性評価のため周方向引張試験追加の可能性が考えられる。

これまでの開発成果を基に、量産対応が可能と考えられる製造技術を適用した場合のODS鋼被覆管の製造コストを試算、量産時の「もんじゅ」用PNC316鋼被覆管と対比した。前提条件は下記の通りとした。

被覆管形状：外径8.5，肉厚0.5，長さ3000mm（300g／本）

ロットの大きさ：MA処理粉末100kg

原料粉末：プレアロイ粉末、量産時には10000円／kgと見込む。

MA処理法：大型アトライター（30kg処理4基、2人×3日）

素管製造法：粉末カプセル（50kg充填）、管押出

被覆管工程：PNC316鋼と同程度の4回圧延工程を適用。

内外管除去、熱処理、工具費のアップ見込む。

検査工程：PNC316鋼被覆管と同じ検査項目と仮定

材料歩留：MA80%，押出70%，被覆管加工70%，検査80%

と仮定

諸経費：製造費の13%を見込む。

検討結果を表3に示す。押出素管までの費用を材料費とすると、「もんじゅ」316鋼被覆管の場合、材料費は製造コスト全体の約18%、被覆管加工費は約48%、検査費は約34%と算定される。これに対して、上の前提条件でのODS鋼被覆管の場合、押出素管製造までの材料費は「もんじゅ」316鋼の4～6倍程度となり、全体コストの約44%を占める。この結果、全体コストは「もんじゅ」316鋼の1.7～2.3倍程度と試算される。ODS鋼被覆管製造コスト低減には、高価な合金粉末の使用、長時間を要するMA処理、処理粉末の固化成形を行う、押出素管製造までのコスト低減が重要であることがわかる。

次に、表3を標準的量産条件とし、これに対する各製造コスト低減因子を検討した。

4.2 素管製造コスト低減化の検討

原料となる合金粉末コストは、被覆管加工までの材料歩留約30%を考慮すると、重要なコスト低減化寄与因子である。現開発段階の小ロット購入で

は、安価な海外購入によっても約15000円/kgとなる。量産時、大量製作の場合には約10000円/kg以下となる見通しがある。さらにコスト低減を図るためには、プレミックス粉末の適用、すなわち量産品である各元素(Fe, Cr, W, Ti)の粉末を購入し、秤量調合して用いる方法である。プレミックス粉末は小規模購入の現状でも約3000円/kgであり、この適用はコスト低減効果が大きい。プレミックス粉末適用により、素管製造コストは表3に示した値より約24%低減し、被覆管製造コストは約11%低減できる。実用化を進めるべき技術である。

MA処理では大型アトライター複数の導入を前提とした。複数基への原料粉末の投入、48h連続運転、MA粉末回収、分級、検査(分析)まで、2人×4日の作業とした。アトライターに替わり、粉末100kgが1度に処理できる大型転動、振動ミルが導入できれば、MA処理に長時間を要するが、無人運転が可能であり、人件費の低減が可能と考えられる。また、粉末投入、取出し、分級、混合一連工程の自動化が多数基を運転する必要のあるアトライターの場合より容易になると考えられる。

粉末を充填するカプセル(約50kg/本)は中空形状を設定した。中空カプセルは複雑な溶接構造となるため製造コストは高い。合理化、低コスト化が必要となる。カプセルへの粉末充填には、振動充填装置を導入し、自動化を図る必要がある。脱気密封は汎用の装置が使用できる。

カプセルを加熱し、熱間押出により、素管形状に仕上げる。粉末カプセルの加熱には生産工場の通常のピレット加熱に使用されている誘導加熱が適用できないため、専用の加熱炉の設置が必要となる。

中空粉末カプセルの適用は、材料歩留、工数削減のメリットはあるが、内外管除去、カプセル製作費が高い、専用加熱炉が必要等のデメリットもある。中空カプセルによる管押出を基準に、さらにコスト低減化策を考えると、カプセルを使用しないで粉末を固化する方法、すなわちCIP処理を利用する方法が考えられる。また、複雑な中空カプセルではなく、簡易なカプセルに充填、脱気、密封し、HIP処理で固化体を作製し、この後の工程はPNC316鋼と同じ、ピレット加工、熱間押出にて素管を製作する方法も、新規設備、技術の導入が不要であり、コスト的に考慮する価値があると判断される。一般にHIP処理は高コストであるが、大型装置により大量処理すれば適用可能性は十分にある。

以上の素管製造コスト低減化寄与因子をまとめると以下の通りである。

- ・原料粉末：プレアロイ粉末の適用
- ・MA処理：大型ボールミルの導入、粉末取扱い作業の自動化

- ・粉末カプセル：形状の合理化

カプセルレス押出（CIP, HIP 処理技術の適用）

さらに、大型ボールミルによる商用化が進行している海外から素管を購入することも、第6章にて詳述するごとく、大量製造時には素管コストが大幅に低減できる可能性が高く、検討する価値が高い。

4.3 被覆管加工コスト

被覆管加工工程におけるコスト低減化寄与因子は、工数削減、加工速度向上、及び歩留向上である。ODS被覆管加工には、現開発段階でも、ピルガー一圧延による4回圧延工程を適用しており、これはPNC316鋼被覆管とほぼ同じ工数であり、大きなコストアップ要因はない。

ODS鋼特有の問題としてコストアップとなるのは、加工後の軟化焼鈍に対し、従来より高温または冷却速度を遅く制御できる熱処理炉が必要になることで、設備の導入と時間を要することで熱処理コスト増は避けられない。また、ODS鋼はPNC316鋼に比べると高硬度であり、圧延ロールの損耗が速く、工具コスト増も考慮しておく必要があると推定される。

粉末カプセルを用いる場合には、ODS鋼管の内外面に残るカプセルを除去する必要があり、とくに内面側の切削技術、設備導入によるコスト増は考慮する必要がある。

以上のようなODS鋼特有の問題により派生する若干のコストアップはあるが、被覆管加工コストはPNC316鋼と大きな差はないと判断される。但し、ODS鋼素管コストは高く、加工工程における材料歩留向上には極力留意する必要がある。表3のコスト試算では暫定的に歩留70%としたが、これを少しでも高めることは、コスト低減への寄与が大きい。

4.4 検査コスト

検査コスト低減化寄与因子は、検査工数削減と検査歩留向上である。また、不良品をなるべく初期の工程でみつけ、早期に除去することもコスト低減となり、途中工程での検査も重要となる。基本的には、PNC316鋼被覆管に適用されている検査項目、基準がODS鋼被覆管にも流用されると考えられる。但し、非金属介在物試験及び炭化物金相試験は不要である。ODS鋼は非金属介在物を大量に分散させたものであり、また炭化物は必然的に析出し、それは被覆管性能に関与するものではない。

ODS鋼特有の問題として、フェライト系ODS鋼は結晶粒が加工方向に伸張しやすいため、軸方向超音波探傷においてノイズが発生し、探傷不能と

なる確率が高い。この場合には、軸方向超音波探傷条件の検討、あるいは別の探傷方法の導入によってコスト増の可能性はある。マルテンサイト系ODS鋼は等軸粒となるのでこのような問題はない。この点を除けば、検査コストはPNC316鋼被覆管と同等と判断される。

4.5 評価

コスト低減化寄与因子の中で、とくに素管製造コストに関する因子の影響が大きい。例えば、プレアロイ粉末の替わりにプレミックス粉末を導入すると、素管製造コストは表3に示した基準値の約76%に低減できる。また、海外購入による素管コスト(20,000円/kg)が実現すれば、素管コストは約39%に低減され、トータルコストは、PNC316鋼被覆管の1.5倍程度まで低減の見込みがある。

被覆管加工工程においては、2ロール圧延と加工軟化のための熱処理がコスト増加因子となるが、これらは今後の試作段階で技術開発が進めば、量産段階で極力低減化が可能になると評価される。加工歩留70%以上の確保が重要である。

検査工程では、検査項目、基準の合理化が必要であり、検査歩留80%以上を目標に開発を進める。

従来の溶解原料からの出発とは異なり、粉末原料から出発するODS鋼被覆管製造では、粉末を固化成形する素管製造までのコスト低減、材料歩留向上が最重要課題である。

以上の結果をまとめて、表3に示したODSフェライト鋼被覆管の製造コストと今後のコスト低減化により達成可能と推定されるコストを、PNC316被覆管との比較で図1に模式的に示した。

5. 素管製造コスト低減のための予備調査

ODS鋼被覆管製造コスト低減化方策中での最重要課題である素管製造コスト低減を進めるために、平成11年度より下記項目の予備調査を実施した。調査結果を以下にまとめる。

5.1 プレミックス粉末の適用性調査

市販の元素粉末(Fe, C, Cr, W, Ti)を購入し、これらを秤量調合してフェライト系、マルテンサイト系ODS鋼目標組成の素管を試作し、化学成分と組織調査を行い、次段階の被覆管試作評価のための素管を準備し

た。

① 化学成分のばらつき

フェライト系については10kg1バッチのMA処理、マルテンサイト系については4バッチのMA処理を行い、各2本の押出素管を試作した。各MA処理粉末及び素管、合計7回の化学成分分析結果から、バッチ間の成分のばらつきはプレアロイ粉末に適用されているばらつき範囲より小さく、かつ不純物成分も十分に低く、適用可能であることが確認された。

② 組織調査結果

プレミックス粉末による素管の硬さは、プレアロイ粉末による素管の硬さと同等であった。電子顕微鏡観察により調査した微細な氧化物粒子の分散状態もプレアロイ粉末の場合と差は認められず、良好であることが確認された。

③ 素管製造結果

プレミックス粉末適用の最終評価は、被覆管試作を行い、その特性がプレアロイ粉末の場合と同等以上であることを確認する必要がある。このために、フェライト系、マルテンサイト系各2本の素管を準備した。

5.2 中空素管の適用性調査

現用の押出棒材のくり抜き加工から素管を製造する方法は、長尺管の製造、量産化の観点から不利である。そこで、MA処理粉末を中空カプセルに充填し、熱間押出で中空素管に直接固化、成形するプロセスを検討した。

小型押出プレス（400トン）を用い、中空カプセルを設計し、小内径素管（外径30mm、内径18mm）の押出実験を行った。試作素管の調査結果から、目標寸法達成の目途を得た。押出素管全長920mmのうち、外管、内管及びODS鋼充填部分の均一な厚さが得られる部分は約500mmであった。充填したODS鋼粉末重量に対する歩留は約57%と低い値であった。しかし、これはカプセルの大型化により改善されるもので、今後の実用化試験にて歩留向上を検討する。

5.3 カプセルレス素管の適用性調査

粉末中空カプセルは構造が複雑で製作コストは高い。また、押出素管にはカプセル内、外管が付着するため、その除去が必要となる。MA処理粉末を押出前に固化できれば、カプセルを用いない（カプセルレス）素管製造が可能となる。平成11年度は、CIP（Cold Isostatic Pressing：冷間等方圧

加圧法) 処理と焼結プロセスによるカプセルレス素管の製造実験を行った。C I P 処理には通常ゴム型が用いられ、金属カプセルは不要である。

① C I P 処理条件検討結果

小型ゴム型を用いMA処理粉末のC I P 処理圧力条件を500～700 MP a の範囲で検討した。MA粉末固化は不可能であった。バインダーとしてパラフィン2重量%を添加した。この場合、圧力600 MP a 以上で固化が可能であった。

② 焼結条件検討結果

C I P 固化体を1150℃にて焼結した。MA粉末の接触部の一部にしか焼結が起こらず、大部分の粉末間には空隙が残留した。焼結密度は約70% (目標90%以上) であった。焼結体の熱間加工実験では割れが発生した。すなわち、真密度比70%程度のC I P 処理、焼結体の熱間押出は不可能であることが判明した。

5.4 評価

平成11年度実施した素管製造コスト低減のための予備調査の評価は下記の通りであった。

① プレミックス粉末の適用性

目標成分達成、バッチ間ばらつき抑制、不純物成分抑制の観点、及び素管の組織から、安価なプレミックス粉末の適用性は十分可能と評価された。

② 中空素管の適用性

中空粉末カプセルから熱間押出による中空素管の製作は、目標寸法達成の目途が得られ、適用性はあると評価された。目標寸法が達成できた素管長さは、充填粉末重量の約57%であったが、大型化による歩留向上、及び内管を高耐食ライナーとして用いる技術開発が今後の課題と考えられる。

③ カプセルレス素管の適用性

C I P 処理、焼結工程によるカプセルレス素管製造実験を行ったが、MA処理粉末は硬く、粒子が粗いため、C I P 処理では固化不十分であり、C I P 固化体の熱間押出は不可能であることが明らかとなった。

この工程に替わるカプセルレス素管製造方法としてH I P 処理の適用が次の検討課題として取り上げた。

6. 海外素管の購入に関する調査

軽水炉炉心材料であるジルカロイ被覆管製造では、素管については海外か

ら購入している実績を踏まえて、ODS フェライト鋼素管についても海外から購入する場合について予備調査を実施した。購入先の候補として予備調査を実施したのは大型ボールミルによる商用化が進んでいる Special Metals 社(旧名: Inco Alloys International 社)であり、商社を通じて情報を入手した。得られた情報の範囲では、コンスタントな大量受注の場合には素管コストは約 20,000 円/kg であり、コスト低減の寄与が大きいことが判明した。

(1) Special Metals 社における商用化されている ODS フェライト鋼素管製造法 (MA956 の例を図 2 に示した)

a) 合金化粉末

メカニカルアロイに使用する合金粉末には、予め合金化したプレアロイ粉末を用いている (ロットが小さい場合にはかなり高価な粉末)。

b) 転動ボールミル

メカニカルアロイは大型の転動ボールミル型を用いて、Ar ガス雰囲気において行っている。1 ボールミル当たりの製品重量は約 250kg である。

c) 粉末固化及び押出

メカニカルアロイによって均質化された合金粉末は、HIP (Hot Isostatic Pressing: 熱間等方圧圧縮) によって固化される (図 2 の上側)。その後、カプセルを除去した後に熱間押出によって押出ピレットを直接に作製している (図 2 の下側)。カプセルレスの管押出のため、単長を長くすることが可能であり、素管製造コストの低減が図られている。

d) 冷間加工

寸法精度を高めるために冷間加工と熱処理を数回繰り返すことにより所定の素管寸法に仕上げられる。長尺素管の寸法は、外径及び肉厚にも依るが一般的には 7000mm の長さ迄は製作可能である。

(2) 適用性の検討

海外から大型素管を購入する場合について、実用化段階の長尺被覆管の 4 回 CR による製造工程について検討した。

例えば、将来の燃料被覆管の寸法を 8.50 OD×0.50 t×2,000 mm と仮定して、4 回 CR で途中の圧延率を 55% (ODS フェライト鋼で割れを生じないで圧延可能な現状での圧延率), Q 値を 1.5 として製造する場合には、素管の形状は計算で一義的に決まり、32.10 O.D.×3.40 t mm にな

る。このときに製造可能な素管長さを 3,000mm とした場合には（実際に本寸法でこの長さの素管が製造可能かどうかについては未調査）、素管 1 本（約 7 kg）から 2 2 本程度の上記 2,000 mm 長さの燃料被覆管の製造（歩留まりは仮に 60% とした）が可能である。

今後、上記海外メーカーでサイクル機構の仕様（32.10 O.D.×3.40 t mm）の元に作製された大型素管から 2,000mm 長さの燃料被覆管を製造して、その性能について評価する計画である。

7. 製造コスト低減に係わる今後の課題

これまでの開発成果を基に ODS 鋼被覆管の量産コストを評価した結果、素管製造コストの割合が大きく、このコスト低減が最重要であることが判明した。平成 11 年度実施した素管製造コスト低減のための予備調査から、安価なプレミックス粉末の適用性が高いと評価された。次年度はプレミックス粉末による素管から被覆管を試作し、特性評価を行い、適用性を確認する必要がある。また、高耐食内管を含めた中空素管の適用性も確認され、今後大型化による検討を進める必要がある。また、カプセルレス素管については CIP 処理の適用は不可能であることが判明し、今後は HIP 処理工程カプセルレス素管の適用性、コスト評価が必要と考えられた。今後検討すべき素管製造プロセスを表 4 に示した。

被覆管製造工程におけるコスト低減は、2 ロール圧延技術と加工軟化処理技術の確立と、歩留向上が課題である。今後の試作開発を通じて達成を図る。

検査工程においては、検査項目、検査基準の合理化、検査歩留向上が課題となる。試作開発を通じてこれらの合理化を達成する。

8. まとめ

実用化戦略調査研究の一環として、取出平均燃焼度 15 万 MWd/t 以上、高速中性子照射量にして $50 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ を達成可能なポテンシャルを有する ODS フェライト鋼被覆管について、現状で考え得る量産コスト評価を行った。将来の実用規模を想定した場合、全コストに占める素管製造コストの割合が大きく、素管製造コストの低減化が重要であることを示した。今年度は、素管製造コスト低減化方策として、安価なプレミックス粉末の適用性を中心に検討した。来年度は、HIP 処理工程カプセルレス素管の適用性、及び海外での素管製造についても評価を行い、ODS フェライト鋼被覆管の製造コ

スト低減の技術的成立性を評価する計画である。

製造した ODS フェライト鋼被覆管については、強度・延性特性や溶接部の検査技術、また耐照射性評価や Na 中試験による耐 Na 腐食性評価を行い、平成 12 年度内に ODS フェライト鋼被覆管の実用化の概略見通しを提示する計画である

表1 ODSフェライト鋼被覆管開発の現状

開発の現状

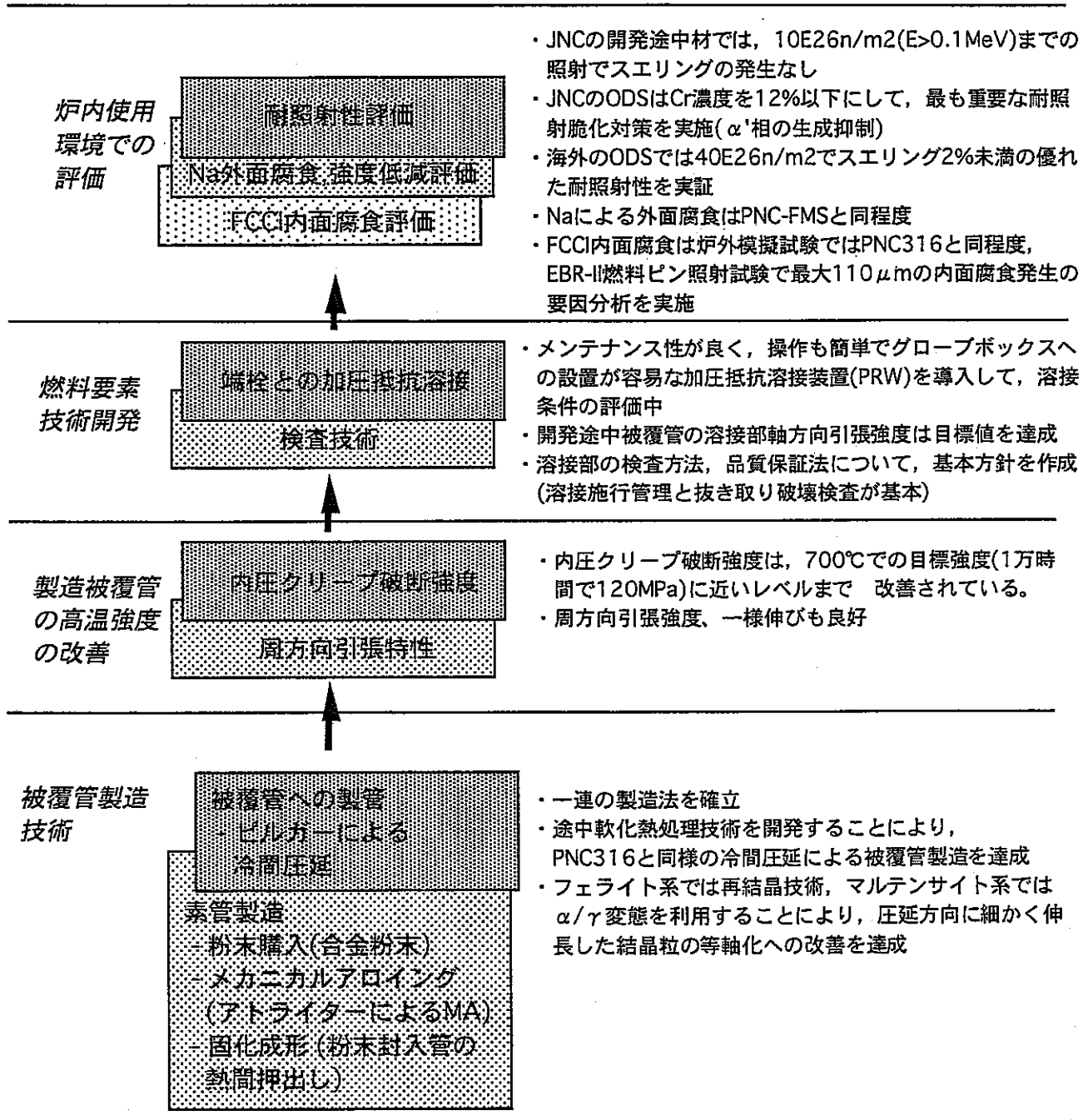


表2 ODS鋼被覆管製造技術の開発課題

工程	適用技術候補	特徴	開発課題	現状コスト	生産コスト
合金組成	フェライト系ODS	12Cr-2W-0.3Ti-0.25Y2O3 強度異方性あり 再結晶率が低い	C,N,Ti量の適正化 再結晶率の向上 UTシフト-エラー対策		
	マルテンサイト系ODS	9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y2O3 強度異方性なし、やや低い 結晶粒が微細	Ti,Y2O3量の適正化 軟化焼鈍法		
合金粉末	Arガスアトマイズ- ブレアロイ粉末	組成均一 信頼性は高い 高価格	アトマイズのための成分調整 コスト低減化	海外購入 15,000円/kg	国内購入(大量) 10,000円/kg
	プレミックス粉末	原料配合が多い 低コスト	ロット間成分ばらつき最小化	3,000円/kg	3,000円/kg以下
メカニカル アロイング	アトライター	高エネルギー、MA時間短い。 処理量が小さい(最大30kg) 歩留小(80%程度)	ほぼ技術確立 大型MA条件検討 *大型MA装置	歩留約80%	
	回転ボールミル	大型化が容易 MA時間が長い。	INCO材の評価		
	振動ボールミル	大型化が容易			
カプセル充填 脱気封入	高温真空脱気処理		*大型カプセル振動充填装置 カプセル設計 適正充填量 *分級機、混合機		
カプセル加熱		誘導加熱適用困難	*粉末カプセル加熱装置 (縦形電気炉)		
素管製造	カプセル押出- 孔あけ加工	実績あり、寸法精度良好 長さ制限(最大350mm) 歩留小、高価		φ18×φ12× 350mmL素管 加工費30000円/本	
	中空カプセル押出	寸法精度、偏肉が大き 内管の処理	高耐食鋼内管の製造技術		
	カプセルレス押出		CIPの適用性評価 HIPの適用性評価		
	海外素管購入	性能不明	素管性能調査、被覆管試作	65,000円/kg	20,000円/kg
熱処理	連続式光輝焼鈍炉	焼ならし処理	フェライト系は高温再結晶 *高温水素焼鈍炉		
	バッチ式真空焼鈍炉	マルテン系の軟化処理	冷却速度の測定 *長尺真空焼鈍炉		
冷間圧延	3ロール圧延	割れ発生率が高い			
	2ロール圧延	加工量が大き 割れにくい。	フェライト系再結晶率最大化工程 *専用圧延機の改良		歩留70%以上 を期待
	引抜加工	加工速度大			
検査	超音波探傷検査	マルテン系は可能 フェライト系は問題。			検査歩留80% 以上を期待
	高耐食内管厚さ測定				

表3 現行の標準的製造工程における量産コスト評価

工程	PNC316	ODS被覆管	コスト比較
押出素管	溶解原料 真空溶解 電極加工 真空二重溶解 ソーキング処理 分解圧延 ピレット加工 押出 (18%)	粉末原料 MA処理 分級、混合 分析 カプセル製作 充填 脱気密封 押出 (44%)	$ODS/316 = 4.1 \sim 5.7$
被覆管工程	抽伸加工 焼鈍 内外面切削 母管検査 (UT, カラチェック) 冷間圧延 水素雰囲気炉 焼鈍 最終冷間抽伸加工 ロール矯正 長さ、真直度 (48%)	冷間圧延 焼鈍 内外管除去 母管検査 (UT, カラチェック) ビルガー圧延 F系高温熱処理炉 M系長尺真空炉 ロール矯正 長さ、真直度 (36%)	$ODS/316 = 1.3 \sim 1.7$ 加工コスト 難加工性によりコストアップ 加工コスト
検査工程	超音波寸法測定 超音波探傷 目視検査 化学成分 結晶粒度試験 非金属介在物試験 炭化物金相試験 RT, 600℃引張試験 硬さ試験 内圧破裂試験 (34%)	F系適用問題 M系適用可 不要、削減 不要、削減 (20%)	$ODS/316 = 1$
トータルコスト比較			1.8 ~ 2.5

*粉末中空カプセル押出50kg/本と仮定

*材料歩留：MA80%、押出70%、製管工程70%、検査80%と仮定

表4 素管製造プロセス

現状の 試作工程	工程1 (中空カプセル)	工程2 (高耐食内管)	工程3 (HIP工程)	工程4 (CIP改良工程)	工程5 (カプセルレス)
MA	MA	MA	MA	MA	MA
カプセル	中空カプセル	内管製作 中空カプセル	キャン	キャン	ゴム型
充填	充填	充填	充填	充填	充填
高温脱気密封	高温脱気密封	高温脱気密封	高温脱気密封	高温脱気密封	CIP
			HIP処理	1150℃加熱 →プレス→加熱	高温真空炉 焼結
			ビレット加工	ビレット加工	ビレット加工
電気炉加熱	電気炉加熱	電気炉加熱	誘導加熱	誘導加熱	誘導加熱
熱間押出(棒)	熱間押出	熱間押出	熱間押出	熱間押出	熱間押出
	脱ガラス	脱ガラス	脱ガラス	脱ガラス	脱ガラス
熱処理 1050℃炉冷	素管熱処理 1050℃炉冷	素管熱処理 1050℃炉冷	素管熱処理 1050℃炉冷	素管熱処理 1050℃炉冷	素管熱処理 1050℃炉冷
	酸洗	酸洗	酸洗	酸洗	酸洗
	矯正	矯正	矯正	矯正	矯正
切削加工 (孔あけ加工)	内外管切削加工	外管切削加工			
素管検査	素管検査	素管検査	素管検査	素管検査	素管検査
冷延工程	冷延工程	冷延工程	冷延工程	冷延工程	冷延工程
孔あけ加工から素管 長さが短くなる。量 産には適用し難い。	カプセル加熱用電気炉が 必要となる。内外管除去 が必要。	電気炉が必要。FCC I対策。内管の材質選 定と厚さの制御。	HIP工程がコスト アップ要因となる。 ビレット加熱は現有 設備で可能。	高温鍛造、焼結によ る密度上昇の確認が 必要。	MA粉末が粗く、硬 いため、CIPによ る固化は困難。
	縦型電気炉新設	縦型電気炉新設検査技 術	HIP固化体の押出実験		
X	○	○	○	△	X

被覆管製造コスト

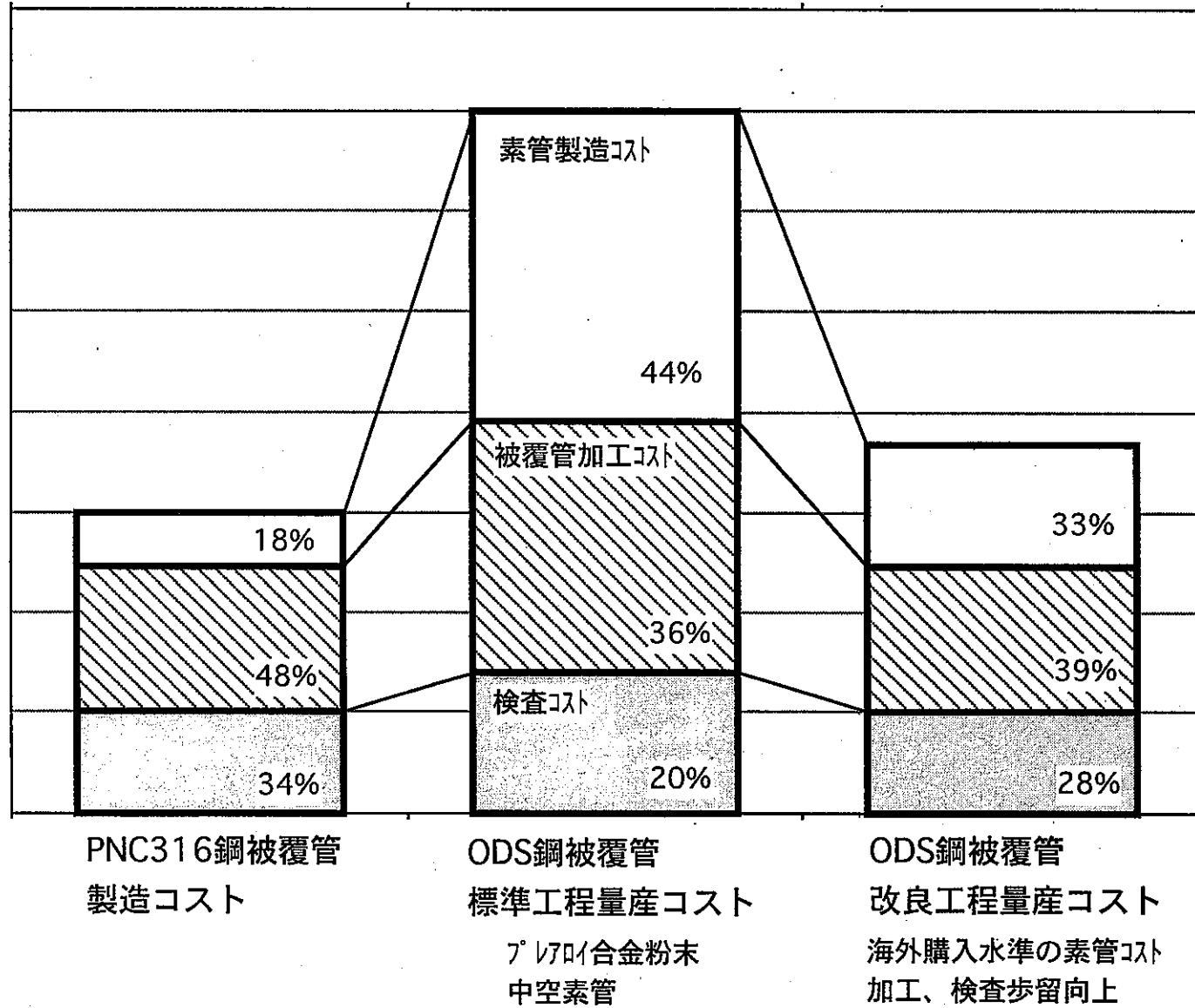


図1 ODS鋼被覆管製造コスト構成

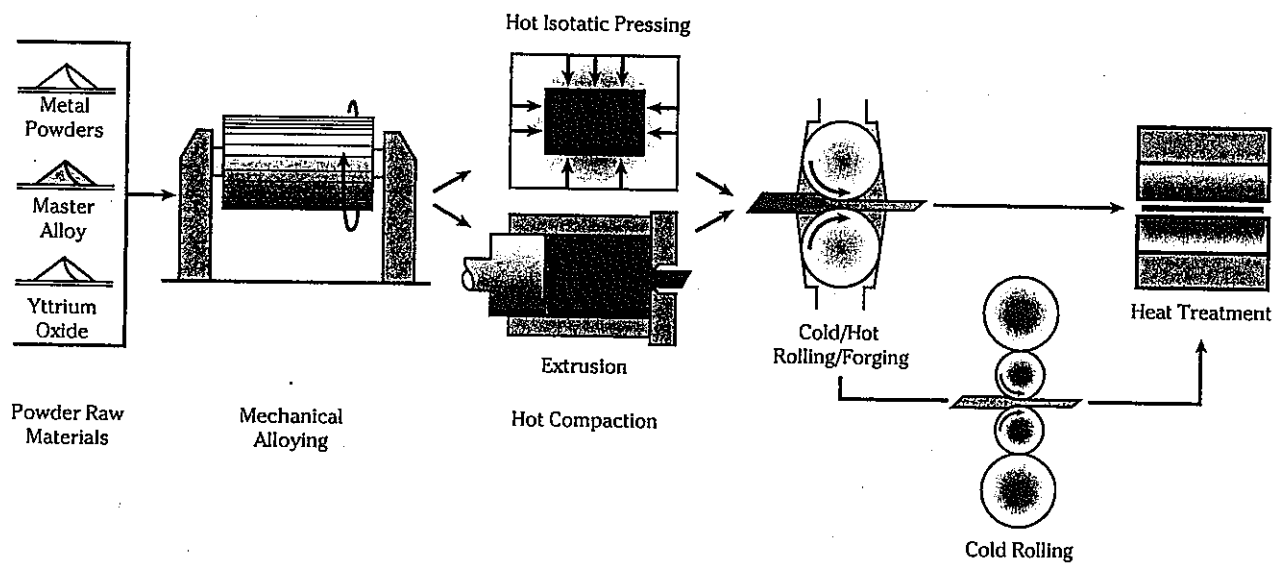


図2 ODS フェライト鋼素管製造法 (MA956 の例)

Publication No. SMC-004
Copyright 1999, Special Metals Corporation
INCONEL, INCOLOY, UDIMET, 800HT and 956HT
are trademarks of Special Metals Corporation.