

原子力プラント用高信頼性伝熱管の開発

Development of High Reliability Heat Exchanger Tube for Nuclear Power Plant

住友金属工業株式会社

三菱重工業株式会社

1. 研究開発の背景と目標

エネルギー需要の増大、将来の化石燃料の枯渇、さらにCO₂による地球温暖化対策の点から原子力発電が不可欠な選択肢となってきた。原子力発電の中で加圧水型軽水炉(以下PWRと称する)は世界で最も広く採用されている。中でも蒸気発生器(図1)は原子炉の熱でタービンへ蒸気を供給するばかりでなく、一、二次系のバウンダリとなっており、蒸気発生器の伝熱管には高い耐食性が要求される。

PWRのプラント数、運転時間の増加により伝熱管の腐食事例が多くなった。このような背景の下、画期的な材料および生産技術を開発することにより、伝熱管の信頼性を抜本的に向上させることを目標とし、以下の3つの技術開発を推進した。

(1) 高耐食新合金の開発

蒸気発生器伝熱管の腐食現象解明による高耐食合金の開発。

(2) 低濃縮管支持板構造の開発

腐食損傷の原因になる不純物(アルカリ)濃縮量を低減する管支持板構造の開発。

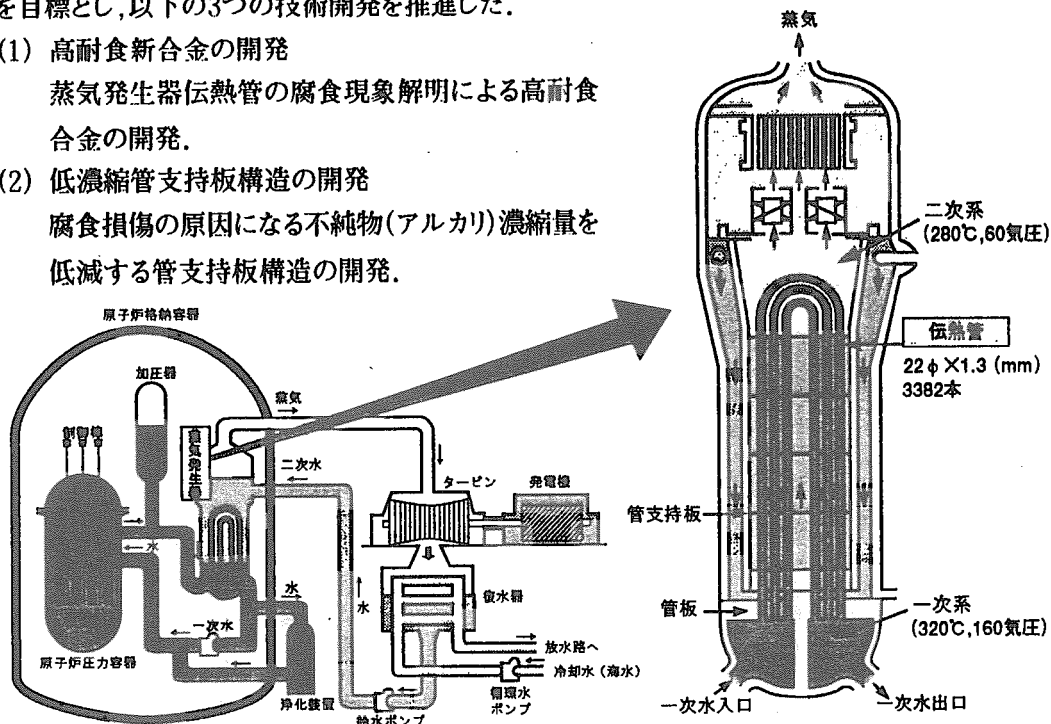


図1 PWRプラントと蒸気発生器

(3) 管内面超平滑製管技術の開発

定期検査時の非破壊検査ベースノイズ低減を達成する製管技術の開発。

2. 研究開発の経過

1970年にPWRが稼働して以降、PWRプラント数は年々増加の傾向にあった。これらのプラントの蒸気発生器の伝熱管(600合金:75Ni-15Cr-10Fe)の一次系、二次系において、1978年以降腐食損傷が発生したので腐食現象解明と同時に耐食合金開発、低濃縮管支持板構造の開発、超平滑製管技術の開発に取り組み総合的な伝熱管の信頼性向上を目指した。

こうした技術開発により1985年には新管支持板を適用し、1988年には新伝熱管「HN60」の製造を開始した。HN60伝熱管を用いたプラントは1991年に運転を開始し、現在まで順調に稼働している。また、既存蒸気発生器の取り替えにも本技術が適用され、1997年には新設と取替えの蒸気発生器を合わせて日本の全PWRプラントの50%以上に本開発技術が適用されることになる。

また、海外PWRプラントでの蒸気発生器取替えにHN60伝熱管が採用され、1993年には海外取替蒸気発生器向けの伝熱管の製造を開始した。

3. 研究開発の内容と特徴

(1) 高耐食新合金の開発

1) 粒界の腐食損傷に対する加速試験法の開発

高耐食新合金の開発には、腐食現象を再現する加速試験法の開発が必須との観点から、一次系と二次系における加速試験法の開発を行った。

一次系の粒界応力腐食割れは高応力歪が集中している箇所に発生し、加速腐食試験法として実管を用いた高応力歪み付加方法(予歪リバースUベンド法)を開発した。

二次系では水中にNa⁺イオンが微量に存在しても管/管支持板のすき間部に混入し、アルカリ濃縮が発生する。二次系の粒界損傷はこうした管と管支持板のすき間部でのアルカリ濃縮が原因であることを解明し、その腐食試験法としてUベンド法によるアルカリ環境での定歪試験法を開発した。

これらの試験法はISO/TC156(金属及び合金の腐食試験法)に提案し標準試験法に採用された。

2) 合金設計

伝熱管用耐食合金としては、一次系と二次系の両環境における耐食性を満足させる必要から、それぞれの環境において必要な合金成分を設計したのち、総合的に基本成分を決定した。

一次系においては、粒界応力腐食割れ防止の点から20%以上のCr量が必要ことが判明した。二次系ではアルカリ中の耐食性が要求され、図2に示すようにCr量の増加やNiの増加により割れ深さは小さくなる。従って、アルカリ環境での粒界損傷防止には、30%以上のCr量と高Ni化が必要ことが判明した。

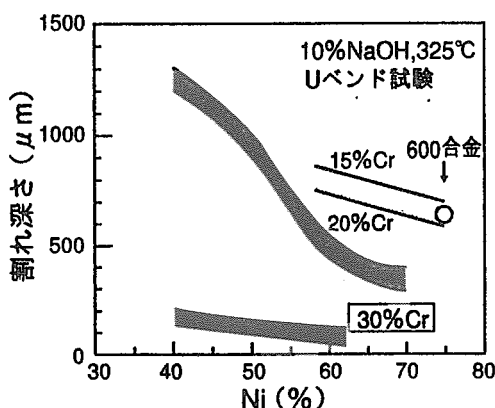


図2 粒界損傷に及ぼすNi,Crの影響

伝熱管では機械的性質や耐食性が使用中に劣化しないように、使用中の組織安定性が要求される。一次系、二次系における腐食試験結果とオーステナイト組織安定性を考慮して、新合金の基本成分は60%Ni-30%Cr-10%Feと決定した。

3) 粒界強化新熱処理法の開発

腐食損傷が粒界の損傷であるため、粒界の腐食抵抗性をさらに強化する必要から粒界強化熱処理法の開発を行った。

600℃～800℃で熱処理を行うと粒界にCr炭化物(Cr_{23}C_6)が析出する。析出形態には、図3に示すように不連続・非整合析出と半連続・整合析出があるが、半連続・整合析出させることにより割れ発生を防止できることが分かった。この半連続・整合析出では図4に示すように粒界がジグザグ状になり、割れ先端での応力の分散および進展経路の増加などにより割れ進展の防止が図れることが判明した。

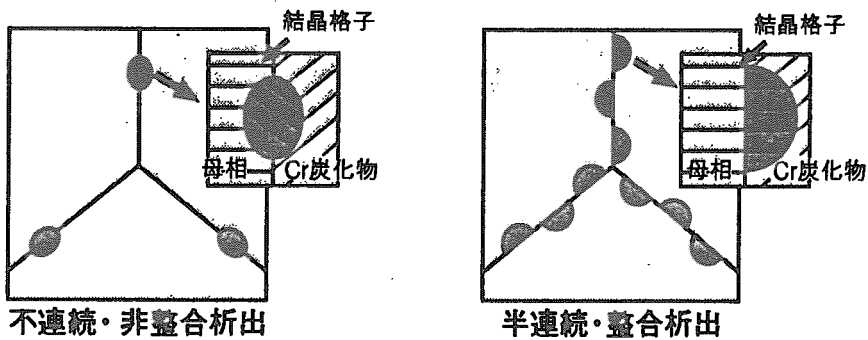


図3 粒界Cr炭化物の析出形態

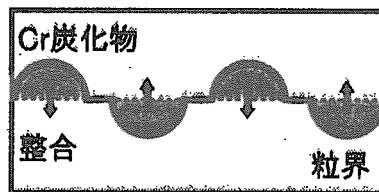


図4 Cr炭化物の半連続・整合析出による粒界構造

Cr炭化物の半連続・整合析出を実現するために、図5に示す第1段の焼鈍と第2段の炭化物析出熱処理の2段階の熱処理を組み合わせた新熱処理法を考案した。ステンレス鋼では耐食性が劣化するため採用されない熱処理であるが、高Ni合金に適用し耐食性向上を狙うということで「逆転の発想」と呼ぶべき熱処理である。

Cr炭化物の析出を、最大かつ半連続・整合析出させるために第1段の焼鈍と第2段の炭化物析出熱処理の最適化を行った。その結果、第2段の炭化物析出熱処理時に炭化物を半連続・整合析出させる焼鈍の最適条件として、①焼鈍温度としてCの完全固溶温度以上、②C量として0.015%～0.030%であることが判明した。

第2段の炭化物析出熱処理では、600℃以上の温度でCr炭化物は粒界に析出するが、保持時間が短いとアルカリ中での耐食性が不十分となる。これより、工業的に最適な条件として、700℃ x15hを採用することに決定した。

4) 伝熱管「HN60」の完成

一次系、二次系の耐食性を合金設計と新熱処理技術を組み合わせることにより、蒸気発生器伝熱管「HN60」を完成した。

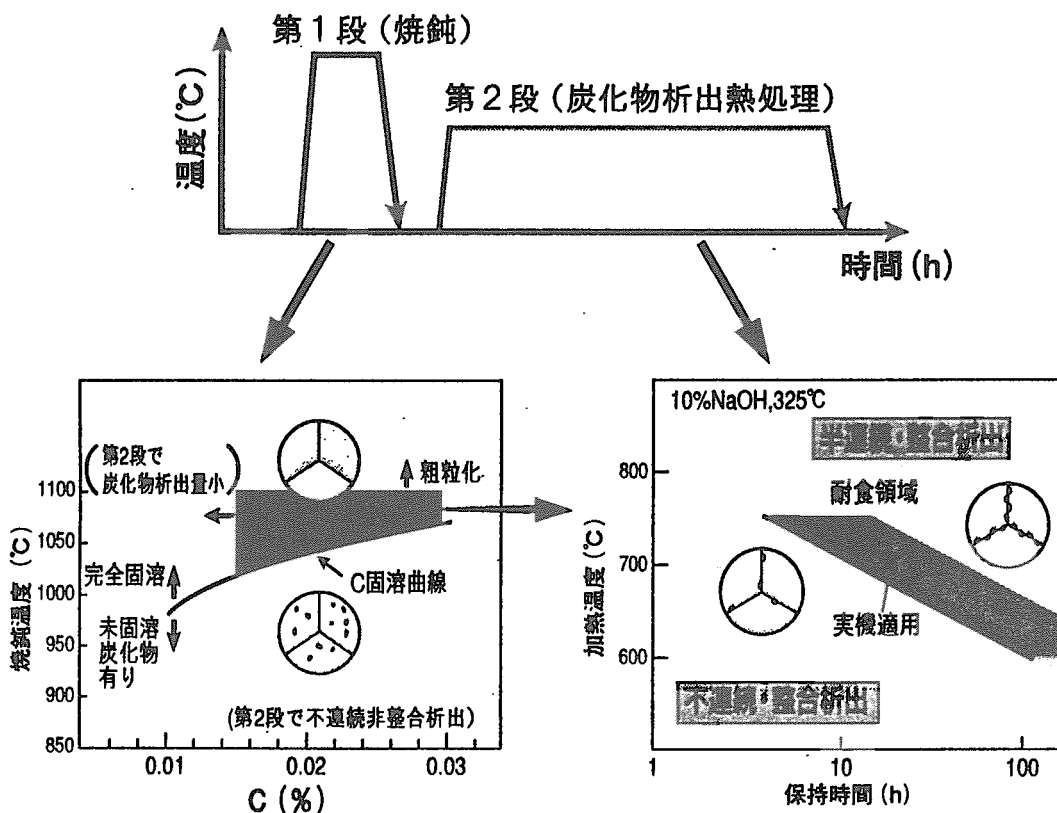


図5 新熱処理プロセスと最適条件

(2) 低濃縮管支持板構造の開発

1) 有害なアルカリ濃縮現象の解明

従来設計の管支持板には、図6に示すように伝熱管を支えるため丸穴の管穴と2次冷却水を通すための水穴が設けられてた。この設計は水穴で水量確保しているため、管穴すき間部での流量が少なく、伝熱管での冷却能力が劣っている。また、伝熱管はフレキシブルに管穴に接触しており、その接触部で微小すき間を形成していることから、2次側水中に有害なアルカリが混入した場合には、この部分で蒸発と液供給がくり返されるドライ&ウェット現象によりアルカリ濃縮が発生し腐食の原因となることを解明した (図7)。

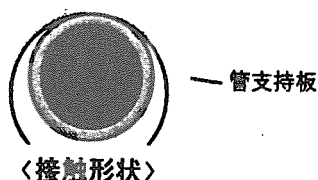
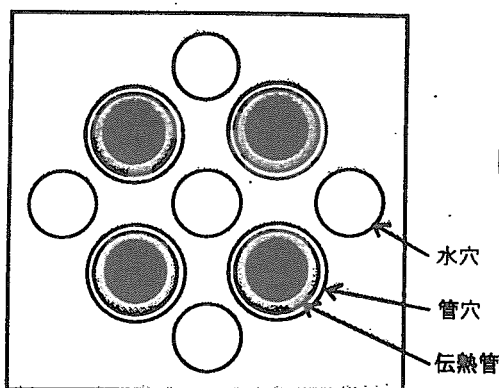


図6 従来型管支持板構造

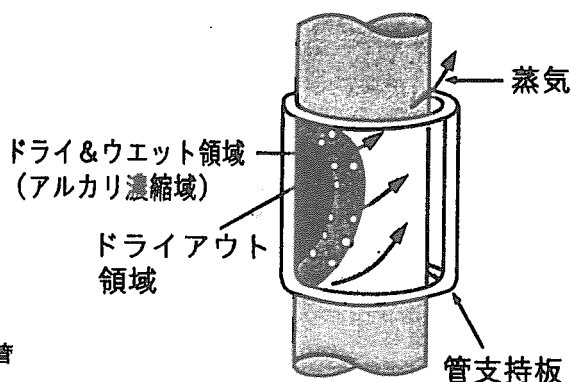


図7 微小すき間部におけるアルカリ濃縮

2) 低濃縮管支持板構造の開発

アルカリ濃縮を低減するためには、ドライ&ウェット領域を生じるような微小すき間を減少させる必要がある。管支持のために接触部をなくすることは出来ないが、接触部近傍を出来る限り効率良く冷却すること及び接触部近傍の空間を出来る限り広げることが必要と考え、図8に示すように①管穴と水穴を一体化(四つ葉型穴型形状)し、流水量確保による接触部冷却能向上、②管と管支持板の円／平面接触による微小すき間領域の減少を図った。

すき間部における不純物の濃縮倍率の検討を行い、図9に示すように丸穴に比べて四つ葉型の新管支持板では濃縮度が1/100となっており、大幅に改善されていることが実証できた。

以上の検討の結果より、低濃縮の「四つ葉型新管支持板構造」を世界で初めて実用化した。

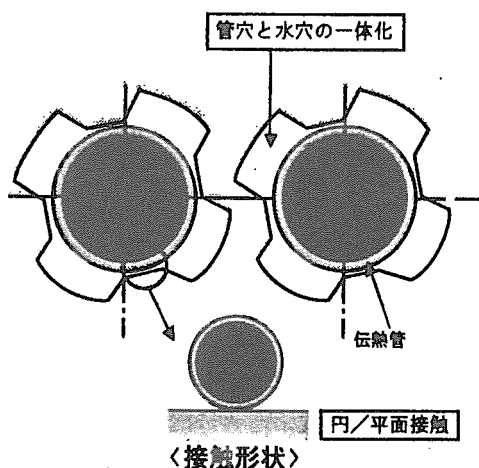
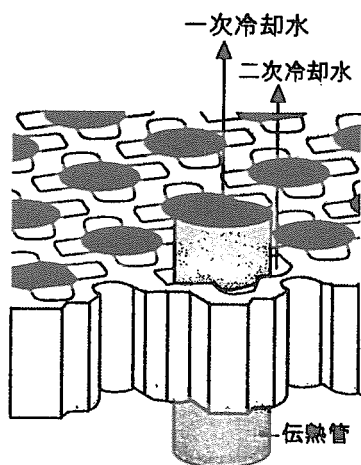


図8 低濃縮管支持板構造

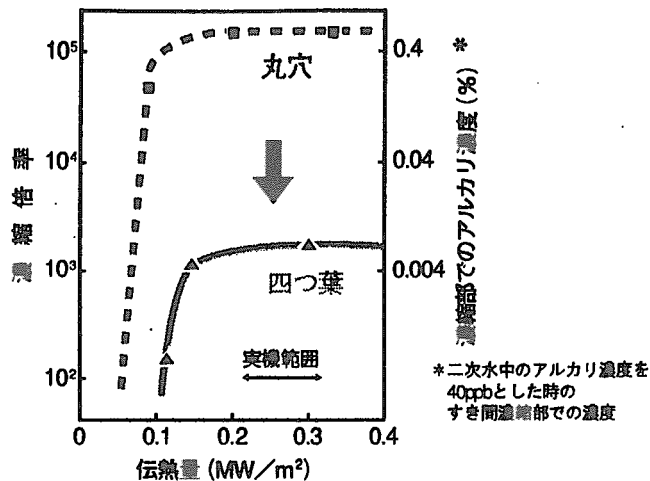


図9 濃縮倍率の低減効果

(3) 管内面超平滑製管技術の開発

原子力発電所における定期検査では、伝熱管の健全性を確認するため内面渦流探傷法が採用されている。欠陥検出感度は、欠陥信号(S)と管に欠陥がなくても発生するノイズ信号(N)の比率(S/N)で評価される。このため、ノイズを低減し検出感度を向上させるため管内面の平滑度の向上が必須となった。

従来の製管法であるマンドレル引抜き法やピルガ圧延法では微小寸法変動が発生し、良好な平滑度を得ることは困難であった。このため平滑度が優れるプラグ引抜き法を基本に新たな管内面の超平滑化技術を開発するため、技術的課題である、①潤滑性の抜本的向上、②高加工度の確保の2点に取り組んだ。

1) 高压潤滑引抜き技術の開発

圧力が上がると潤滑油の粘度が増加し潤滑油の引き込み量の増加が図れることに着目し、高压潤滑引抜き法を着想した。つまり、図10に示すように潤滑油を満たした高压容器に素管全体を挿入し、外部から高压を負荷し管内外面を理想的な潤滑状態の下で引き抜くことである。最適圧力の検討の結果、100MPa以上で良好な潤滑状態が得られ、図11に示すように100～150MPaでは加工度50%以上を達成できることが明らかとなった。

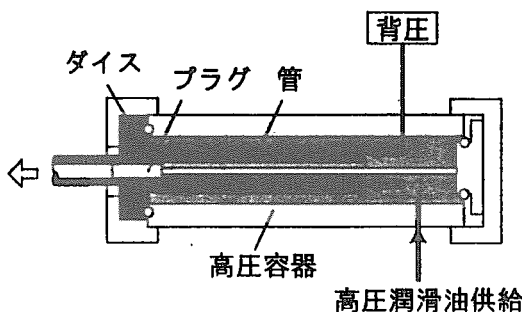


図10 高压潤滑引抜き法概念図

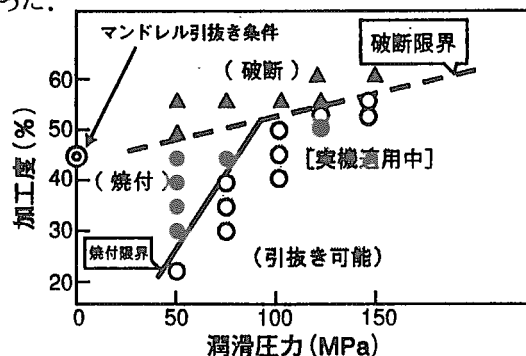


図11 潤滑圧力VS. 破断加工度限界

2) 高圧潤滑引抜き設備技術の開発

高圧潤滑引抜きを実用化するために、①高圧シールの安定化、②管ハンドリングの簡素化(高生産性の確保)、③安全性・作業性の確保に取り組んだ。

まず、高圧容器の潤滑油シールで最も重要なダイス面のシール方法として、図12に示すように前後にスライド可能なセルフシールシリンダ機構を開発した。この機構により、実作業でも安定した高圧シールを確保できると共に、管のハンドリングが極めて簡素になり高生産性を実現した。

また、引抜き完了時の高圧開放に伴う爆発音の発生や潤滑油の飛散を防止するために管端検出器を考案し、引抜き完了直前で圧力を下げることにした。この管端引抜き制御法により、爆発音と潤滑油飛散問題を完全に解消できた。

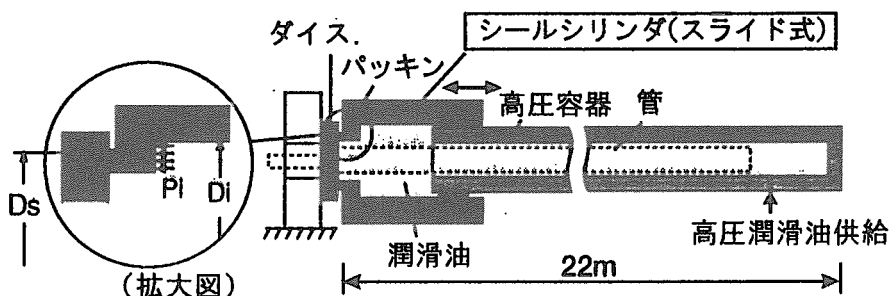


図 12 セルフシール機構

4. 信頼性向上に向けた技術開発の成果

(1) 耐食性向上

次系の粒界応力腐食割れに対するHN60伝熱管の耐食性能は、図13に示すように、従来合金(600合金)に比べHN60では同じ応力値でも応力腐食割れを発生せず、割れ発生時間からみて少なくとも100倍の耐食性があることが実証できた。

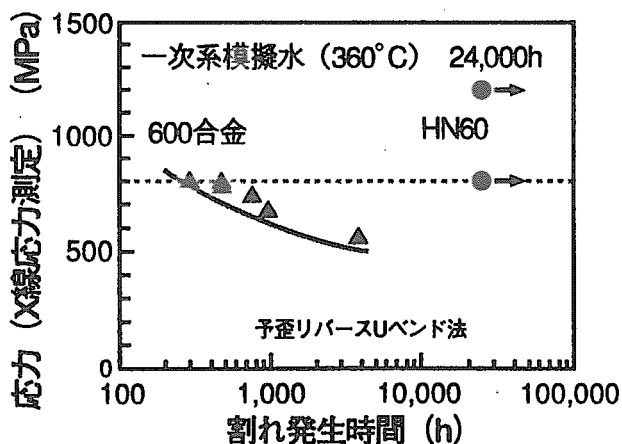


図 13 一次系における耐食性向上効果

二次系の腐食損傷防止に対しては、新合金に加え管支持板開発による環境改善の相乗効果が期待できる。HN60の耐食性は、図14に示すように割れ発生時間からみて従来合金の約10倍である。また、管支持板部でのアルカリ濃縮が1/100になるため、耐久時間が10倍に増加する。これらのことから、全体の耐食性が100倍に向上した。

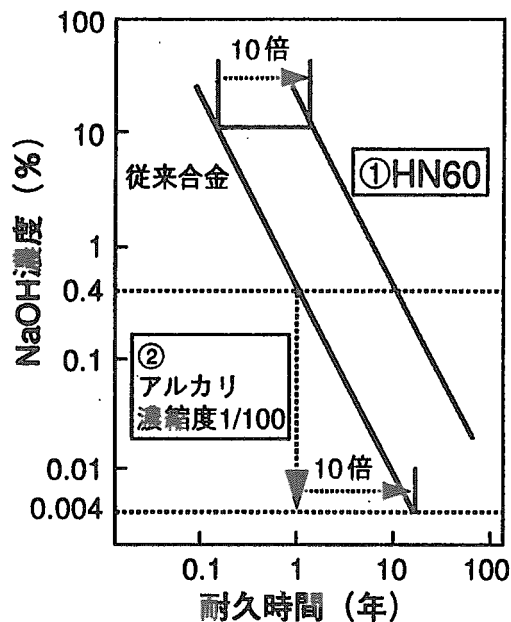


図14 二次系における耐食性向上効果

(2) 非破壊検査性向上

表1に各種製管法による伝熱管の内面渦流探傷におけるベースノイズ比較を示す。高压潤滑引抜き法による管では従来法よる伝熱管に比べ、粗さ、S/N比ともに3倍以上に向上させた。

表1 内面渦流探傷のベースノイズ比較

	粗さ	出力信号	S/N比
標準欠陥	—	 4v (S)	—
高压潤滑引抜き法	3 μm	 0.18v (N)	15-23
マンドレル引抜き法 (従来法)	10 μm	 0.57v (N)	4-10

非破壊検査：渦流探傷

5. 研究開発の成果

開発した技術は、国内では1991年以降の新設プラントおよび蒸気発生器の取り替えプラントのすべてに適用されており、国内でのシェアは100%である。また、海外でもシェア約50%であり、国内、海外併せて約3500トン（蒸気発生器約70基分、延べ5000km）の製造を行っている。

本技術適用によりPWRプラントの稼働率は著しく向上した。従来プラントでは定期検査時の補修期間が長く稼働率は62%であったが、本技術適用プラントでは85%に増加した。この稼働率向上により、1994年時点で発電コスト低減約300億円／年に貢献している。

また、原子力発電はCO₂排出の少ない非常にクリーンな発電形式であり、電力需要の伸びを考慮した場合、CO₂による地球温暖化防止には不可欠と考えられている。稼働率向上によりCO₂排出量として187万トン／年を削減し、日本の総CO₂排出量に対して0.6%の削減に寄与している。

6. 学会発表、特許等

関連特許は国内で45件出願し、25件が登録されている。海外においても5カ国に13件出願し既に9件の登録がされている。

発表論文は、国内外で45件を数え講演数も44件に達している。さらに日本金属学会技術開発賞（1990年）を始め、日本塑性加工学会会田技術賞（1993年）など5件を受賞している。

7. 今後の展望

本開発技術は、加圧水型軽水炉の中核機器である蒸気発生器の信頼性を著しく高め、世界のエネルギー安定供給に寄与している。今後とも、加圧水型軽水炉の主要技術として原子力発電の信頼性を維持すると共に、経済的にも多大な貢献をするものと確信している。