

図2 伝熱管材料の360℃温度加速PWR一次系模擬水中耐SCC性  
SCC感受性の順位は溶体化600, MA 600, TT 600の順であり, TT 690合金は感受性は見られない。  
Stress corrosion cracking resistance of tubing material at 360 °C in temperature accelerated PWR primary water

母相と整合したCr炭化物を析出させると, 耐SCC性は一層向上することが, 各種試験材の金相学的評価により判明した。

なかでも図3のように, 粒界に半連続状に析出した $M_{23}C_6$ が隣合う母相に交互に整合し, あたかも結晶粒界をジッパで結んだようになったもの(整合タイプB)<sup>(3)</sup>は最も耐SCC性に優れている。

た, Cr量を27~31%と高くし, 完全溶体化処理後, 上述のTTを施したTT 690合金では, 粒界に析出した $M_{23}C_6$ は整合タイプBの形態を示し, 最も耐SCC性に優れたものと考えられる。

### 2.2 TT 690合金の蒸気発生器伝熱管材としての特性

上記のTT 690合金について, 伝熱管材としての使用性能を, 従来の焼なまし600合金(MA 600), TTを施した600合金(TT 600), 800合金(JIS NCF 800)のC量を低減したもの(800 L合金)と比較検討した。検討では, PWR蒸気発生器伝熱管材として要求される引張性質, へん平, 押し広げ特性, 硬さ, 疲労特性等の機械的性質, 熱伝導度, 拡管性, 溶接性, 非破壊検査性等の一般的特性のほか, 耐食性を重点に行った。耐食性については, PWR一次系模擬水中での耐全面腐食性, 温度を高め加速した一次系模擬水中での耐SCC性及び二次系水中に混入した海水やNaOH等の不純物がクレビス部(伝熱管と管板・管支持板とのすきま部)で濃縮した場合の極端な加速環境下での長時間耐食性等について検討を行った。

いずれの供試材ともに, 上記の機械的性質等一般的性質では顕著な差異は認められず, 伝熱管材として適していた。

しかし, 前掲図2に示すように360℃と約40℃温度を高め加速した一次系模擬水中においてMA 600, TT 600合金はSCC感受性を有しているのに比べ, Cr量を約30%と高めたTT 690合金は負荷応力を非常に高めた試験においてもSCCは発生せず, 極めて高い耐SCC性を有していることが判明した。

二次系水の加速環境として10% NaOH溶液で行ったSCC試験の結果でもMA 600, TT 600, 800 L合金と比較し,

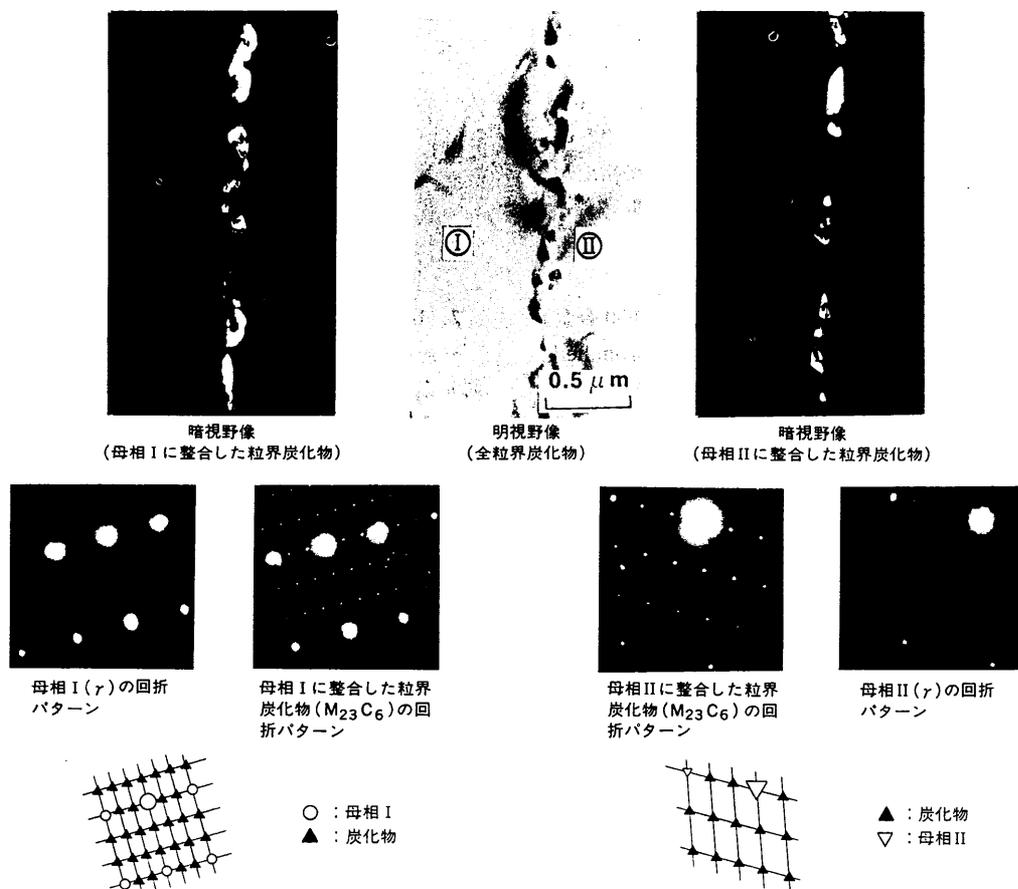


図3 TT 690合金の粒界炭化物析出状況(整合タイプB) 適正仕様を持つTT 690合金では粒界に半連続状に析出した炭化物は隣合う母相に交互に整合したものとなっている。  
Morphology and coherency of grain boundary carbides in Alloy 690 (Coherent type B)

TT 690 合金は優れた耐 SCC 性を有しており、MA 600 合金で問題となっている粒界腐食損傷 (IGA) に対しても高い抵抗性を有していることが判明した。この理由についても同様のメカニズムが考えられる。すなわち図4に示すように、MA 温度と C 量の組合せにより同じ TT を施した材料がこの環境で SCC (IGA) を生じないのは、結晶粒界に  $M_{23}C_6$  が整合タイプ B の析出をしている場合であることが分かる。

以上のような研究成果を反映し、TT 690 合金の実機適用に当

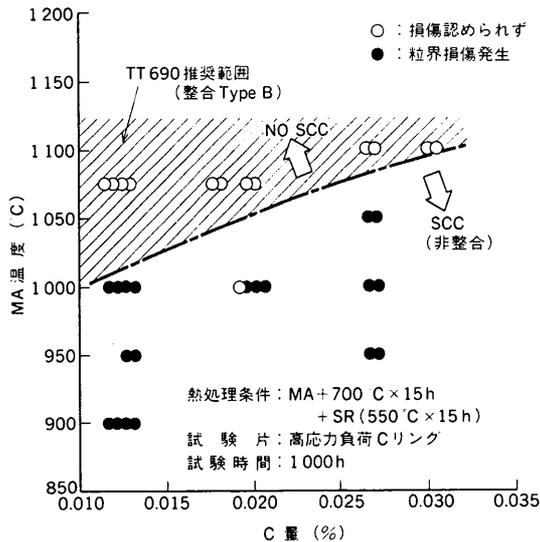


図4 TT 690 合金の 343℃ 脱気 10% NaOH 中での耐 SCC 性に及ぼす MA 温度、C 量、粒界析出形態の影響 整合タイプ B を示す領域とアルカリ中の耐食性が良好な領域とはほとんど一致している。 Effect of mill annealing temperature, C content and grain boundary precipitates morphology on stress corrosion cracking resistance of Alloys TT690 at 343℃ in deaerated 10% NaOH solution

たっては、MA 温度と C 量を適切に選択した最も耐食性に優れた材料を用いている。

### 3. BEC 型管支持板部の耐食性<sup>(1)</sup>

伝熱管/管支持板間のクレビス部は不純物が濃縮しやすい部位であり、伝熱管が MA 600 合金の一部の蒸気発生器では IGA 等の発生が認められた。このため、より耐食性の高い伝熱管材料の開発や管支持板穴形状の改良による濃縮度の軽減等が検討され、それらの信頼性は以下のように確認されている。

#### 3.1 管支持板クレビス部の濃縮度評価

伝熱面クレビス部では、沸騰に伴う乾湿交番により局部濃縮が生じるが、その際の濃縮度はクレビス形状に大きく依存する。その改善を狙って開発した BEC 型管支持板の効果を把握するため、クレビス内での濃縮度を評価し、従来の丸穴型と比較した。

濃縮度は次の 2 種類の手法により評価した。

析出法：クレビス内に NaF が過飽和析出し始める試験水中 NaF 濃度から濃縮度を評価する (大気圧条件下可視化試験)。

皮膜法：伝熱管表面皮膜性状と試験水中不純物濃度の関係を利用して濃縮度を求める [実圧条件下 (62.5 ata, 15~30 × 10<sup>4</sup> kcal/m<sup>2</sup>·h) で試験後、皮膜分析で評価]。

管支持板部の濃縮度と熱流束の関係を図5に示す。実圧、大気圧のいずれの条件ともほぼ同様の結果となっており、丸穴型は高熱流束条件では約 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup> 倍の濃縮度となるのに対し、BEC 型では約 10<sup>3</sup> 倍であり、100 倍以上の濃縮度低減効果が認められた。

#### 3.2 二次系水中環境下での IGA 発生条件の把握

改良型伝熱管材料の改善効果を把握するとともに、IGA の発生条件を明確にするため、以下の検討を行った。

供試材としては、MA 600、TT 690 合金を用い、300℃ における溶液の pH 及び電極電位をパラメータとして、オートクレープ中で試験を行った。試験方法として定引張り速度試験 (CERT)

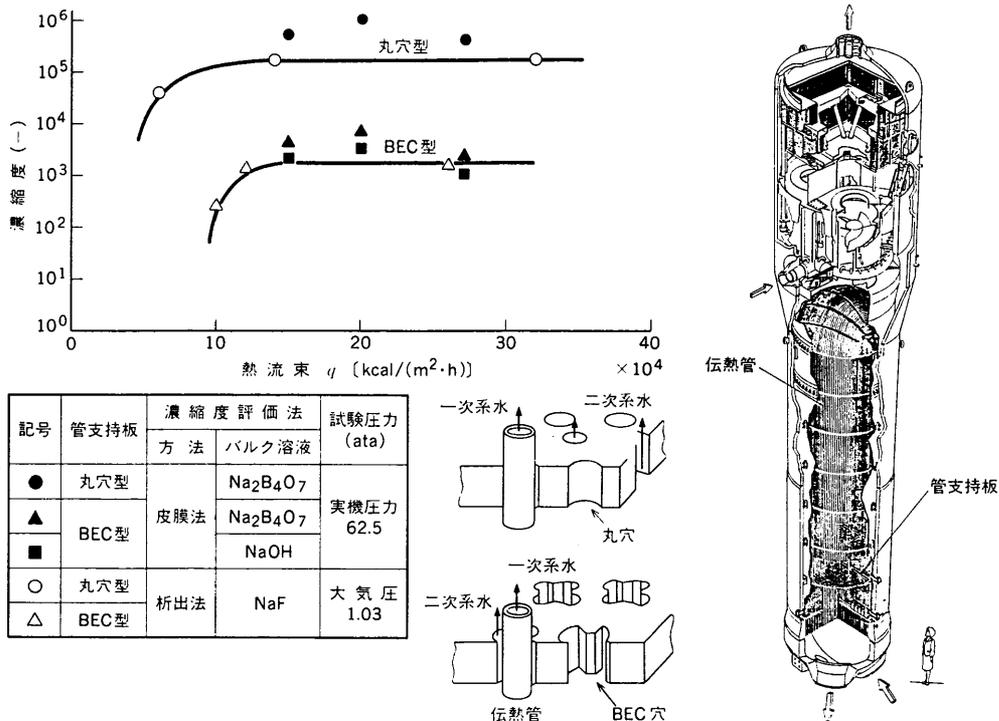


図5 管支持板クレビス部の濃縮度と熱流束の関係 BEC 型クレビスの濃縮度は約 10<sup>3</sup> 倍で、丸穴型の約 10<sup>5</sup> 倍に比べ 1/100 に低減している。 Correlation between concentration factor in tube/tube support plate crevice region and heat flux

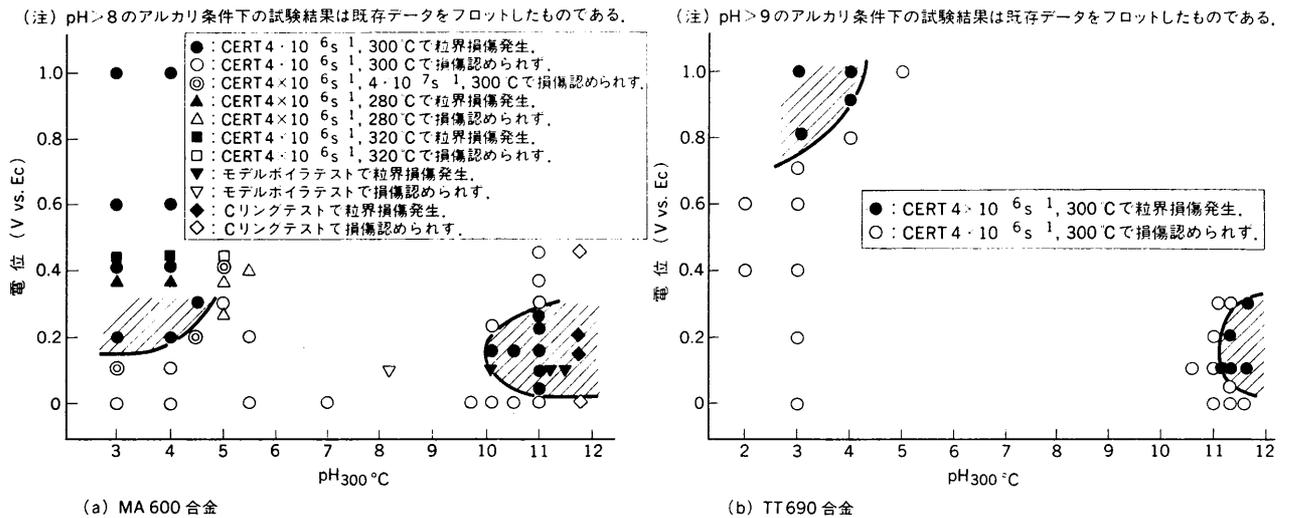


図6 伝熱管材料の高温水中におけるIGA発生条件 TT 690合金とMA 600合金のIGA感受性領域を比較するとアルカリ、酸側共前者の領域がずっと小さくなっている。  
IGA susceptible region of tubing materials in high temperature solutions

表1 モデルボイラ試験結果の概要  
Summary of model boiler test results

伝熱管	管支持板	試験時間	破壊検査
MA 600	SB 42 丸穴	15 181 h	最大約 100 μm の IGA 発生
TT 690	SUS 405 BEC		異常なし
TT 690	SUS 405 BEC	26 781 h	異常なし
		33 913 h	異常なし

法を用い、破断面の粒界破面の有無によりIGA感受性を評価した。

MA 600合金及びTT 690合金のIGA発生条件を、電位とpH<sub>300°C</sub>をパラメータにして、図6に示す。酸性条件ではMA 600合金が200 mV以上の電位条件でIGA感受性を示したのに対し、TT 690合金では800 mV以上の過不動態領域でのみ感受性が認められた。アルカリ条件では、MA 600合金はpH<sub>300°C</sub> 10以上で、TT 690合金は11.3以上で、いずれの材料も活性溶解-不動態遷移領域付近の電位条件でIGA感受性を示した。以上より、酸性及びアルカリ条件共にTT 690合金の耐IGA性の改善効果が認められた。

3.3 実機模擬条件下長時間試験

改良型伝熱管材料及びBEC型管支持板構造による信頼性向上効果を総合的に評価するため、モデルボイラにて長時間試験を実施した。供試体として、伝熱管(MA 600, TT 690)/管支持板(炭素鋼/丸穴, SUS 405/BEC)の組合せを用いた。試験装置は実機の運転条件を再現可能な蒸気発生器模擬ループを使用した。本試験では腐食環境を加速する目的で、温度を高めるとともに、水質面では、二次系給水(NH<sub>3</sub>とN<sub>2</sub>H<sub>4</sub>によるAVT処理)中に微量のアルカリ(~10 ppb NaOH)を連続的に注入した。

試験後、供試体を破壊し詳細に調査した。結果を表1に示す。丸穴型管支持板と組合せたMA 600合金には最大約100 μmのIGAの発生が認められたが、同じ管支持板と組合せたTT 690合金及びBEC型管支持板と組合せた伝熱管には異常は認められなかった。モデルボイラ器内水中のNaOH濃度と濃縮倍率を基に推定したクレビス部の腐食環境を、各伝熱管材料のIGA発生条件(NaOH濃度)と比較すると、本モデルボイラ試験の結果は良く一致し(図7)、各要素試験結果の妥当性も同時に確認された。

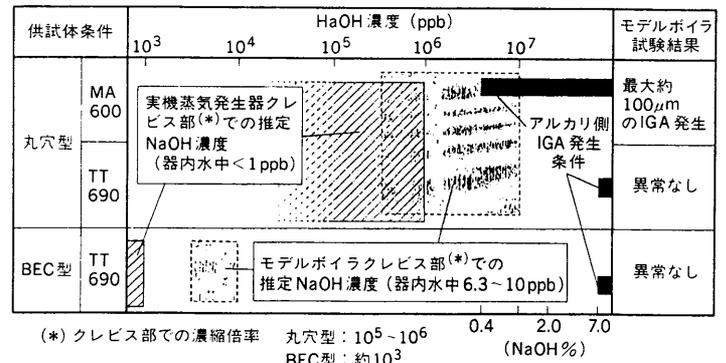


図7 モデルボイラ試験結果と要素試験結果の比較 要素試験結果の組合せにより推定される損傷発生領域とモデルボイラ試験結果との一致は良好である。  
Comparison between results of model boiler test and fundamental experiments

なお実機では器内水中のNaイオン濃度は1 ppb以下に管理されており、図7中に示すようにMA 600-丸穴型でもIGAの発生の可能性は極めて低く、改良設計では更に余裕があることが分かる。

4. あとがき

以上述べたように、最新型蒸気発生器は、改良型伝熱管材料及改良型管支持板形状の採用により、伝熱管の耐食性に関し十分な信頼性を有しており、またその他の面についても多くの改良設計が採用されている。さらに現在はAPWR向け蒸気発生器の開発を進めている。蒸気発生器問題の社会的・経済的重要性にかんがみ、蒸気発生器の良好な運転実績を積重ねることが信頼性を回復するため最も重要であり、引続き信頼性向上を第一として、努力を続けていく所存である。

参考文献

- (1) (財)発電設備技術検査協会, 蒸気発生器伝熱管信頼性実証試験報告書(平6-3)
- (2) Yonezawa, T. et al., "Effect of Metallurgical Factors on SCC of Ni-base Alloys in High Temperature Water" JAIF Int. Conf. on Water Chemistry in Nuclear Power Plant, Tokyo (1988)
- (3) 米澤ほか, 日本金属学会誌 Vol.48 No.3 (1984) p.238